

Mémoire

Auteur : Wynants, Julien

Promoteur(s) : Schmitz, Serge

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23891>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



**Faculté des sciences
Département de géographie**

Investigation méthodologique sur la mise en œuvre d'une trame noire sur le site du Sart-Tilman

Mémoire présenté par : **WYNANTS Julien**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques,
orientation Global Change à finalité approfondie aspects humains des
changements environnementaux**

Année académique :

2024-2025

Date de défense :

Septembre 2025

Président de jury :

Pr. Xavier FETTWEIS

Promoteur :

Pr. Serge SCHMITZ

Jury de lecture :

Pr. François JONARD

Pr. Grégory MAHY



**Faculté des sciences
Département de géographie**

Investigation méthodologique sur la mise en œuvre d'une trame noire sur le site du Sart- Tilman

Mémoire présenté par : **WYNANTS Julien**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques,
orientation Global Change à finalité approfondie aspects humains des
changements environnementaux**

Année académique :

2024-2025

Date de défense :

Septembre 2025

Président de jury :

Pr. Xavier FETTWEIS

Promoteur :

Pr. Serge SCHMITZ

Jury de lecture :

Pr. François JONARD

Pr. Grégory MAHY

Remerciements

Je tiens à remercier mon promoteur, Serge Schmitz, pour sa disponibilité, ses corrections et ses observations qui ont largement contribué à la réalisation finale de ce travail.

Je remercie également tous les membres du Parc naturel des Sources pour m'avoir permis de travailler le sujet durant mon stage et de rencontrer Thierry Kervyn, sans qui ce travail aurait sûrement été plus complexe à traiter.

Je tiens aussi à remercier Jean-Christophe ainsi que tous les autres master 2 pour leur amitié, leur aide et leur soutien. Je pense sincèrement que même si ce travail est personnel, la dynamique de notre classe m'a permis d'avancer au maximum.

Enfin, j'aimerais remercier ma famille et mes proches qui ont essayé de comprendre le sujet, qui ont relu ce travail et qui ont partagé leurs avis. Merci à Hélène pour m'avoir accompagné de nuit en terrain.

Résumé

Le campus du Sart-Tilman, situé au sud de la Ville de Liège, est un site principalement forestier qui joue un rôle clé au sein du réseau écologique liégeois. Ce mémoire a pour objectif d'évaluer la pertinence de la mise en place d'une trame noire sur ce territoire en combinant une analyse d'image satellite nocturne avec une résolution spatiale fine et du réseau écologique du Sart-Tilman. Une méthodologie complète a été conçue, reposant sur la construction d'une trame lumineuse et un croisement spatial avec les trames existantes du réseau écologique et leurs corridors écologiques associés. Quatre trames sont représentées : les forêts feuillues, les lisières, les prairies et les milieux ouverts secs. Les analyses ont été enrichies par le biais d'un inventaire des espèces de chauves-souris et d'une visite de terrain.

Les résultats démontrent que, malgré la surface au sol relativement limitée de la lumière, cette dernière fragmente fortement le paysage nocturne. Plus de 60 % de la surface éclairée est concentrée sur les routes principales et communales. De plus, les intersections entre la trame lumineuse et les trames écologiques révèlent que les zones centrales forestières restent relativement préservées, à l'inverse des zones de développement et des trames lisières et des prairies. Plusieurs corridors sont également impactés par l'éclairage nocturne principalement autour des trois zones majeures de conflit : le campus, le Centre Hospitalier Universitaire et le site du Blanc Gravier.

Ces observations permettent d'identifier des sites à restaurer en priorité et confirment que la mise en place d'une trame noire ciblée représente une réponse pertinente et opérationnelle pour préserver la continuité écologique nocturne sur le Sart-Tilman.

Abstract

The Sart-Tilman campus, located south of the city of Liège, is a mainly forested site that plays a key role within the Liège ecological network. This thesis aims to assess the relevance of implementing a dark ecological network (“trame noire”) in this area by combining high-resolution nighttime satellite imagery analysis with the ecological network of Sart-Tilman. A complete methodology was developed, based on the construction of a lightscape layer and its spatial overlay with the existing ecological network and their associated ecological corridors. Four sub-networks are represented: deciduous forests, forest edges, grasslands and dry open habitats. The analyses were further supported by a bat species inventory and a field survey.

The results show that, despite the relatively limited ground surface area affected by light, it significantly fragments the nocturnal landscape. More than 60% of the illuminated surface is concentrated along main and local roads. Furthermore, intersections between the lightscape and the ecological networks indicate that the central forest areas remain relatively well preserved, in contrast to development zones as well as forest edges and grasslands. Several ecological corridors are also impacted by artificial lighting, mainly around the three major conflict zones: the campus, the University Hospital Center and the Blanc Gravier site.

These findings make it possible to identify priority areas for restoration and confirm that the implementation of a targeted dark ecological network is a relevant and practical solution to preserve nocturnal ecological continuity in Sart-Tilman.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Table des figures	7
Table des tableaux	9
Lexique	10
Introduction	11
1. Les enjeux clés.....	13
1.1. L'Homme et le paysage	13
1.2. Le réseau écologique.....	16
1.3. Mise en avant des trames	18
2. L'émergence de la nuit comme enjeu	20
2.1. Pollution lumineuse ou nuisance ?	22
2.2. Enjeu biodiversité.....	24
2.3. Enjeu humain.....	27
2.4. La reconnaissance du ciel étoilé et de la pollution lumineuse	30
2.5. La législation européenne et belge	31
3. Les trames noires dans la littérature scientifique.....	34
3.1. La conception d'une trame noire.....	34
3.2. Les sources de données exploitées	36
4. Etat des lieux en Belgique	40
4.1. Les projets de trame noire.....	40
4.2. Projet intégré en Wallonie.....	41
5. Contexte du site d'étude	42
6. Matériel et méthodes.....	46
6.1. Les hypothèses	46
6.2. Les sources de données et traitements	47
6.3. Mise en évidence de la pollution lumineuse	71
6.4. Zones de conflit.....	73
7. Résultats	75
7.1. Mise en évidence de la pollution lumineuse	75
7.2. Mise en évidence des points de conflits	87

Discussion	103
1. L'emprise de la lumière artificielle nocturne sur le Sart-Tilman	103
2. Pertinence d'intégrer une trame au sein du réseau écologique	104
3. Réponses aux hypothèses	106
4. Les enjeux du territoire	107
5. La méthodologie	108
6. Apports et perspectives	111
Conclusion.....	112
Annexes	115
Bibliographie	127

Table des figures

Figure 1 : Représentation schématique de l'évolution historique de la matrice du paysage dans laquelle des taches anthropiques deviennent dominantes.....	13
Figure 2 : Taux d'extinction et de colonisation, les deux facteurs régissant la persistance d'une population au sein du paysage.....	18
Figure 3 : Résumé schématique des causes et des impacts généraux associés à la pollution lumineuse.....	29
Figure 4 : Représentation du périmètre d'étude situé sur le site du Sart-Tilman ainsi que des différents périmètres des sites d'intérêt pour la biodiversité.....	45
Figure 5 : Luminosité du Sart-Tilman mesurée par la bande DNB du satellite VIIRS/NPP de la NASA durant la nuit du 25 mars 2020.	48
Figure 6 : Image satellite nocturne du Sart-Tilman prise le 25 mars 2020 à 22h02 par le satellite Jilin1-7b.	49
Figure 7 : Réponse spectrale relative du satellite Jilin1-3B.....	50
Figure 8 : Echantillon de photos prises durant la nuit du 16 au 17 avril 2025	55
Figure 9 : Cartographie de l'occupation du sol sur base des données disponibles sur WalOnMap	58
Figure 10 : Représentation du zonage opérationnel de la sous-trame des forêts feuillues humides du réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman	62
Figure 11 : Représentation du zonage opérationnel de la sous-trame des forêts feuillues mésophiles du réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman	64
Figure 12 : Représentation du zonage opérationnel des trames des milieux ouverts secs et des lisières du réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman.....	66
Figure 13 : Représentation du zonage opérationnel de la trame des prairies du réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman.....	68
Figure 14 : Représentation cartographique de la luminosité par pixel au sein du site d'étude....	76
Figure 15 : Histogramme de la luminosité calculée.....	76
Figure 16 : Représentation graphique de la luminosité observée moyenne par intervalle de distance par rapport à la route la plus proche.	77
Figure 17 : Localisation des photos réalisées sur le terrain dans la nuit du 16 au 17 avril 2025 ..	80
Figure 18 : Photos prises à proximité des parkings du Sart-Tilman sur le boulevard de Colonster	81

Figure 19 : Photos prises à proximité du rond-point Simone David Constant	82
Figure 20 : Photo d'une façade du B4	83
Figure 21 : Photo de l'allée descendant vers le restaurant universitaire et le B7a	83
Figure 22 : Photo du B7a en direction des bâtiments de chimie	84
Figure 23 : Photo d'un sentier menant vers le B7b avec les bâtiments de physique sur la gauche et la RNA derrière	84
Figure 24 : Photos du rond-point Marcel Florkin et de son éclairage.....	85
Figure 25 : Photos modifiées sur le logiciel GIMP	86
Figure 26 : Représentation cartographique de la trame lumineuse identifiée et de la trame lumineuse potentielle sur le site du Sart-Tilman.....	88
Figure 27 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la sous-trame des forêts feuillues humides	90
Figure 28 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la sous-trame des forêts feuillues mésophiles	91
Figure 29 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des lisières.....	92
Figure 30 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des milieux ouverts secs.....	93
Figure 31 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des milieux ouverts secs.....	94
Figure 32 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des prairies	95
Figure 33 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et les corridors écologiques existants relatifs à la sous-trame des forêts feuillues mésophiles	97
Figure 34 : Zones de conflit potentiel entre la sous-trame des forêts feuillues mésophiles et les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam et al. (2018).....	99
Figure 35 : Zones de conflit potentiel entre les corridors de la sous-trame des forêts feuillues mésophiles et les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam et al. (2018).	100
Figure 36 : Zones de conflit potentiel entre la trame des lisières et les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam et al. (2018).....	101
Figure 37 : Zones de conflit potentiel entre la trame des prairies et les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam et al. (2018).....	102
Figure 38 : Représentation schématique du plan de travail séparé en quatre phases distinctes.	110

Table des tableaux

Tableau 1 : Valeurs des coefficients de gain et d'offset pour les bandes rouge, vert et bleu de l'image satellite Jilin1-7b.	51
Tableau 2 : Classification des pixels de la couche d'occupation du sol issue du Géoportail de Wallonie (2022b).	56
Tableau 3 : Distribution de la luminosité observée sur le site d'étude.	78
Tableau 4 : Espèces de chauves-souris contactées lors de l'inventaire du DEMNA sur le site du Sart-Tilman en 2023.....	87

Lexique

Ecotope : un écotope correspond à une unité écologiquement homogène au sein du paysage (Gillet *et al.*, 2024).

Écotone : transition entre deux écosystèmes. La lisière d'une forêt est un écotone (Géoconfluences, 2025).

Matrice paysagère : élément spatialement continu d'un paysage. La matrice paysagère correspond à la couverture du sol dominante au sein de laquelle des noyaux de biodiversité s'insèrent (Opdam *et al.*, 2005).

Tache : terme traduit de « patch » qui est utilisé dans la littérature internationale sur l'écologie du paysage. Une tache correspond à un noyau d'habitat naturel distinct au sein d'une matrice de non-habitat (Fahrig, 2013).

Tache de vestige : une tache de vestige désigne une zone d'habitat naturel isolée dans un paysage perturbé, modifié par les activités anthropiques (Riva *et al.*, 2024).

Introduction

La conservation de la biodiversité ne peut plus être pensée indépendamment des dynamiques humaines. L'anthropisation croissante des territoires génère de nombreux obstacles aux déplacements des espèces, ce qui entraîne une volonté de protection et de restauration des milieux naturels ou pouvant accueillir la biodiversité. Ainsi des études de réseaux écologiques voient le jour, amenant à la logique actuelle de « trames », visant à assurer une continuité écologique entre des milieux similaires à travers des espèces particulières. Certaines trames sont bien connues comme les trames vertes et bleues, faisant référence respectivement aux milieux terrestres et aquatiques.

Néanmoins, la continuité écologique ne peut se limiter à des surfaces et des corridors pensés sans tenir compte du cycle journalier. En effet, la nuit et le paysage nocturne connaissent des perturbations supplémentaires, invisibles durant la journée. Afin de poursuivre ses activités durant la nuit, l'Homme, en tant qu'espèce diurne, a cherché à éclairer son environnement proche. Cet éclairage entraîne des risques de nuisance tels que l'éblouissement direct ou la lumière intrusive, qui révèle le domaine privé. De plus, l'éclairage nocturne peut se révéler être la source d'une pollution perturbant les comportements de la flore et de la faune, qu'elle soit diurne, nocturne ou crépusculaire, pouvant entraîner de profonds changements. Il devient alors indispensable d'intégrer cette dimension temporelle et les ruptures nocturnes provoquées par l'éclairage artificiel au sein des dispositifs classiques de trames vertes ou bleues. En réaction, le concept de trame noire a émergé récemment. Cette trame correspond à un réseau écologique fonctionnel intégrant les caractéristiques propres à l'espace nocturne en complément des trames écologiques diurnes existantes.

Face à ce constat, la géographie, par sa capacité à articuler les échelles, les temporalités et les dimensions humaine et naturelle, offre un cadre d'analyse pertinent. Le géographe, grâce à une vision holistique, est en mesure d'explorer les interactions entre les trames écologiques et les usages anthropiques, en intégrant les besoins des espèces et des populations exploitant le site.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire, qui propose une méthodologie d'analyse spatiale de l'éclairage nocturne sur le site du Sart-Tilman, un territoire à la fois urbanisé et fortement boisé. Le campus du Sart-Tilman est également un des quatre campus qui composent l'Université de Liège. Ce site promet largement l'écrin boisé dans lequel il est intégré.

Bien que l'Université se soit dotée récemment d'une analyse du réseau écologique du Sart-Tilman, aucune analyse de l'impact des lumières artificielles nocturnes n'a été réalisée.

L'objectif de ce mémoire est de mettre en place une méthodologie permettant d'évaluer la pertinence de la construction d'une trame noire sur le Sart-Tilman. Ce projet s'attache à mettre en lumière les conflits d'usage entre besoins écologiques et pratiques humaines, notamment en matière d'éclairage public ou privé. Il vise également à explorer les enjeux de gouvernance liés à la mise en place de mesures d'atténuation. Pour ce faire, ce travail débute par une recherche de littérature portant sur les réseaux écologiques et les trames, ainsi que sur la controverse entre les notions de nuisance et de pollution lumineuse. Cette analyse permet également de préciser les enjeux de la pollution lumineuse pour la biodiversité et pour la santé humaine tout en introduisant le concept de trame noire. Le contexte du Sart-Tilman est ensuite présenté, avant de détailler le matériel et les méthodes employés. Une méthodologie spécifique est développée dans le cadre de ce travail, s'appuyant à la fois sur la littérature scientifique, les données disponibles et sur l'expérience acquise lors d'un stage professionnel au Parc naturel des Sources consacré à l'identification de la pollution lumineuse. Cette approche permettra de caractériser et cartographier la pollution lumineuse du site, d'en analyser les enjeux et d'identifier les zones de conflit avec le réseau écologique. Enfin, les résultats obtenus seront confrontés aux hypothèses initiales afin d'évaluer la pertinence de la mise en place d'une trame noire sur le Sart-Tilman.

Travailler à la reconnexion nocturne des espaces naturels demande ainsi de dépasser les oppositions entre espaces naturels et anthropiques. Pourtant, face à la complexité du phénomène, qui mobilise des disciplines variées, des acteurs multiples et des données hétérogènes, la solution peut sembler paradoxalement simple. Un geste, en apparence anodin, devenant le symbole d'un curseur entre l'appropriation collective du paysage nocturne et les besoins de la biodiversité : débrancher la prise.

1. Les enjeux clés

1.1. L'Homme et le paysage

De tout temps, l'Homme a marqué le paysage de son empreinte, ce qui a mené inévitablement à une réduction des espaces naturels. En effet, avec le développement de l'agriculture au Néolithique, l'Homme se sédentarise. Ce changement de régime amène l'humanité à modifier son environnement à une échelle spatiale de plus en plus large au fil des époques. Le modèle « nature-agriculture-urbanisation » décrit cette séquence de transformation du paysage, passant d'une matrice naturelle à une matrice majoritairement urbanisée (Bogaert *et al.*, 2014). La figure 1 montre le changement de la matrice dominante au cours du temps. Dès le début de l'agriculture, la surface occupée par les espaces naturels se réduit au profit de zones agricoles. Ensuite, l'amélioration constante des techniques agricoles permet aux populations de diversifier leurs activités et de sortir du modèle agricole, menant à l'urbanisation du paysage.

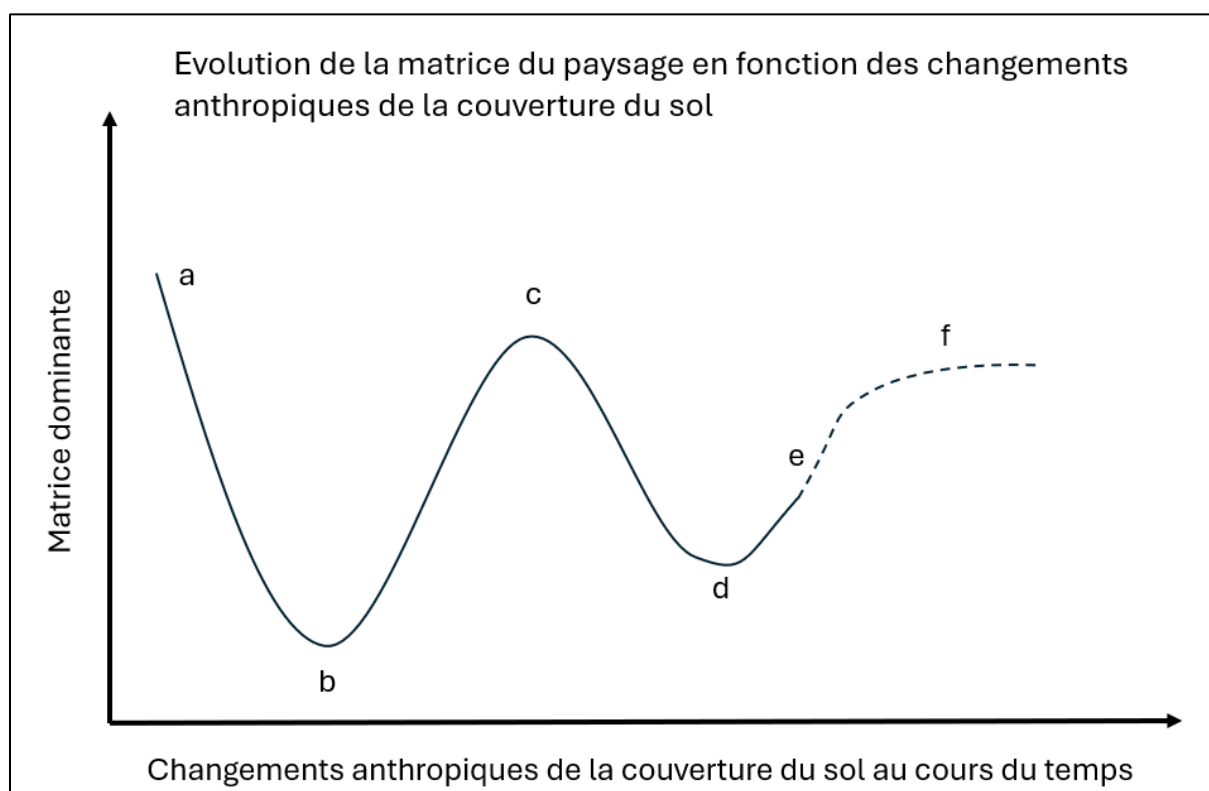


Figure 1 : Représentation schématique de l'évolution historique de la matrice du paysage dans laquelle des taches anthropiques deviennent dominantes. (a) dominance de la matrice naturelle initiale, (b) réduction de la matrice dominante des taches naturelles au profit de taches agricoles jusqu'à arriver à la co-dominance des deux types de taches, (c) dominance maximale des taches agricoles au sein du paysage suite à l'augmentation des taches agricoles, (d) co-dominance des taches agricoles et urbaines suite à la transformation d'espaces agricoles en taches urbaines, (e) augmentation des taches urbaines, (f) évolution théorique vers un état d'équilibre au sein du paysage. Auteur : WYNANTS Julien, 2025, inspiré de Bogaert et al. (2014).

Les changements globaux du paysage ont donc amené les espaces naturels à diminuer en termes de surface, au profit des activités humaines.

Ces modifications ont conduit à un devoir de protection de l'environnement. En 1972 se tient à Stockholm la Conférence des Nations Unies sur l'environnement, plaçant cet enjeu au premier rang des préoccupations internationales. Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) est également créé au cours de cette conférence. L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) rédige, en coopération avec le PNUE et le WWF (World Wide Fund for Nature), un rapport sur la stratégie de conservation mondiale en 1980 (UICN, 2023). Ce rapport développe notamment le principe de développement durable. En 1987, c'est au tour de la Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED) de publier un rapport « Notre avenir à tous ». La notion de développement durable se définit comme « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité à satisfaire ceux des générations futures* » (Office fédéral du développement territorial ARE, s.d.). En 1992 se tient le « Sommet de la Terre » de Rio où la Convention sur la Diversité Biologique (CDB) est signée. Cette convention avait, notamment, pour objectif de conserver la biodiversité biologique (Nations Unies, s.d.) et a permis l'intégration du terme de biodiversité au sein du langage commun. Par la suite, d'autres rassemblements mondiaux se sont tenus autour de la biodiversité, par exemple à Johannesburg en 2002 ou les diverses Conférence des Parties (COP). Néanmoins, la perte de biodiversité reste un sujet actuel et majeur. En effet, la sixième extinction de masse des espèces se déroule actuellement (IBPES, 2019 ; Maljean-Dubois, 2023). Ce constat rejoint l'avis de Pimm *et al.* (1995) qui ont estimé que les taux d'extinction des espèces durant les quatre derniers siècles sont 100 à 1000 fois supérieurs à ceux observés dans les archives paléontologiques.

Pour faire face à ce déclin, des stratégies de conservation ont été mises en place. En premier lieu, l'objectif a été de protéger des sites considérés comme extraordinaires, c'est-à-dire composés d'espèces et d'habitats rares, menacés et/ou protégés. Le principe repose sur des aires protégées isolées et statiques. En Belgique, la Loi sur la Conservation de la Nature (Ministère de l'Agriculture, Ministère des Finances, Ministère de la Santé publique et de la Famille et Ministère des Travaux publics, 1973) accorde un statut de protection à force variable à des espèces aussi bien animales que végétales. À l'échelle européenne, les directives Oiseaux et Habitats ont été adoptées par l'Union européenne, respectivement en 1979 et 1992. Ces deux directives ont permis la construction du réseau écologique européen Natura 2000, protégeant physiquement les principaux sites de repos et de reproduction des espèces visées.

De ce fait, les espèces rares et menacées ont été particulièrement visées (Jägerbrand & Bouroussis, 2021). Les activités humaines y sont limitées ou dirigées, avec comme objectif principal de promouvoir la biodiversité. De plus, les grands projets publics et privés requièrent une évaluation des incidences sur l'environnement, sur base de la directive *Evaluation des incidences sur l'environnement* (Jägerbrand & Bouroussis, 2021 ; Commission européenne, 2025a). Les plans et programmes publics, dont l'objectif est notamment l'utilisation des sols, l'énergie, les déchets ou l'agriculture, sont soumis à la directive *Evaluation environnementale stratégique* (Jägerbrand & Bouroussis, 2021 ; Commission européenne, 2025b). Ces deux directives visent à intégrer les questions environnementales au sein des projets.

Néanmoins, une politique de conservation visant à protéger la biodiversité jugée comme « exceptionnelle » n'est pas suffisante. En effet, cette approche ne considère pas les caractéristiques du paysage extérieur et renferme le site sur lui-même (Myers *et al.*, 2000). De plus, cette politique néglige les paysages anthropiques alors qu'il est également nécessaire de préserver et restaurer les taches de vestiges présentes (Riva *et al.*, 2024). La mise en place d'un critère de taille minimale est en réalité plutôt contreproductive pour la conservation de la biodiversité car de nombreuses petites taches connectées entre elles peuvent, en fonction du contexte, accueillir autant de biodiversité qu'une seule grande tache (Haddad *et al.*, 2015 ; Riva *et al.*, 2024). Enfin, protéger de grandes surfaces fermées limite grandement les capacités de dispersion des espèces.

En effet, les populations se déplacent au sein du paysage. Cependant, la fragmentation croissante des habitats naturels dégrade la qualité de vie des espaces, ce qui en fait une des raisons majeures de la perte de biodiversité à l'échelle globale (Battisti, 2003 ; Fischer & Lindenmayer, 2007 ; Haddad *et al.*, 2015). La fragmentation est une conséquence de divers processus : destruction, réduction et isolation de l'habitat ou encore la modification de l'habitat naturel (Battisti, 2003). De ce fait, ces zones deviennent de plus en plus petites tandis que la distance entre deux zones voisines augmente (Opdam, 1991 ; Fischer & Lindenmayer, 2007), entravant les échanges entre réservoirs. Les dynamiques de déplacement sont, de ce fait, importantes à prendre en compte lors de la conservation de la biodiversité. Dès lors, une analyse spatiale trop fine d'un processus écologique, comme les déplacements, occulte son rôle et son importance au sein d'un système plus large, rendant les mesures prises peu efficaces sur le long terme (Francis & Antrop, 2021). Néanmoins, les zones protégées constituent une première approche dans la conservation de la biodiversité et du paysage. Battisti (2003) suggère de travailler sur le ratio aire/périmètre de la zone protégée afin d'améliorer ses qualités de

conservation. En effet, une forme compacte et régulière comme le cercle permet de réduire au maximum l'effet de bordure. Ces principes de conservation sont repris au sein de la stratégie mondiale de conservation rédigée en 1980 par l'UICN, tout en proposant une classification afin de déterminer les espèces menacées prioritaires en fonction de l'imminence de la perte et de l'ampleur de celle-ci (UICN, 2023).

Cependant, au vu de la composition diversifiée des paysages, il est difficilement possible de comparer et répliquer les résultats obtenus à la suite de la stratégie de conservation utilisée. Les décisions adaptées doivent généralement être prises à une échelle locale.

1.2. Le réseau écologique

Le réseau écologique constitue une nouvelle approche de la préservation de la biodiversité, dans la continuité des zones protégées. Le réseau donc s'inscrit lui aussi dans une logique de conservation de la nature et se développe en parallèle de ce concept. Opdam *et al.* (2006) définissent le réseau écologique comme un ensemble d'écosystèmes d'un même type, reliés en un système spatialement cohérent par des flux d'organismes, et interagissant avec la matrice paysagère dans laquelle ils s'inscrivent. De plus, ces auteurs insistent sur le fait que le réseau écologique est un concept reliant des écosystèmes et de ce fait, est multi espèces. Par conséquent, l'approche plus statique des zones isolées contenant de la biodiversité exceptionnelle évolue vers une approche dynamique de connexion de sites.

Selon Jongman (1995), des mentions de corridors verts et de leur importance dans la conservation de la nature peuvent déjà être trouvées durant les années 1920. L'idée n'en est qu'à ses prémices et il faudra attendre les années 1980 pour observer un intérêt plus général pour ces liaisons entre les zones réservoirs des espèces. La réflexion autour de la connectivité entre réservoirs durant les années 1980 est également en lien avec le développement de l'écologie du paysage. Cette science interdisciplinaire s'est appropriée des éléments d'autres sciences comme la géographie, les sciences sociales et l'écologie (Kirchhoff *et al.*, 2013 ; Francis & Antrop, 2021) afin d'étudier les interactions entre les formes du paysage et ses fonctions à travers le temps et l'espace. L'échelle du paysage est développée afin d'étudier les flux d'individus à une échelle plus large que celle de l'écosystème (Sordello, 2017). À cette échelle, le territoire peut se découper en « nœuds » et en « liens » en s'inspirant de la théorie des graphes afin de construire un réseau écologique (Dale & Fortin, 2010). Sordello (2017)

définit les nœuds comme des réservoirs, c'est-à-dire les milieux les plus préservés présentant une biodiversité riche. Les liens sont, quant à eux, les corridors reliant les divers réservoirs afin de faciliter les déplacements au sein du réseau. En effet, le paysage est hétérogène et de ce fait, une portion de l'espace, appelée « matrice », présente des conditions plus hostiles pour le déplacement et la vie de la biodiversité étudiée. Le réseau écologique est inscrit au sein de cette matrice. De ce fait, l'échelle du paysage s'avère pertinente afin d'appréhender les impacts des actions humaines sur les processus et les structures écologiques tout en étant une échelle pertinente pour développer des mesures de mitigations et de restaurations.

La conception d'un réseau écologique se base en partie sur la théorie de la biogéographie insulaire développée par MacArthur et Wilson en 1967. Cette théorie soutient que la richesse en espèces d'un territoire dépend de sa surface, de son isolement ainsi que des interactions de compétition des espèces au sein du territoire. Ainsi, il est possible d'estimer un équilibre dynamique, régi par le taux d'extinction, en lien avec la surface, et par le taux d'immigration qui dépend de l'isolement du milieu, présentés sur la figure 2 (Connor & McCoy, 1979). Dès lors, la persistance d'une population au sein du paysage dépendra de cet équilibre dynamique. D'un point de vue opérationnel, le maintien d'une population dépendra de l'adaptation du réseau aux facteurs limitant le taux de colonisation et accroissant le taux d'extinction (Harchies *et al.*, 2018). De ce fait, si la surface des sites est limitée, l'idéal est d'accroître la connectivité des sites afin de contrebalancer le taux d'extinction par un taux de colonisation plus élevé. À l'inverse, si les sites sont isolés, il faut maximiser la surface disponible.

Dans ce cadre, il est également possible de mentionner une troisième théorie : la théorie des métapopulations. Cette dernière renforce l'importance de la prise en compte de la fragmentation d'un habitat naturel dans les stratégies de conservation de la biodiversité à l'échelle du paysage. En effet, Opdam (1991) définit une métapopulation ainsi « *un ensemble de populations réparti au sein d'un nombre de fragments d'habitats est appelé une métapopulation tant que les unités qui la composent sont interconnectées par des individus dispersés* ». De ce fait, cette théorie décrit le comportement d'une métapopulation qui est régi par les capacités de recolonisation de réservoirs vides des populations locales ainsi que leur taux d'extinction local. La fragmentation impacte ces deux facteurs, en réduisant la connectivité des inter-espaces et en perturbant les qualités de vie de ces espaces.

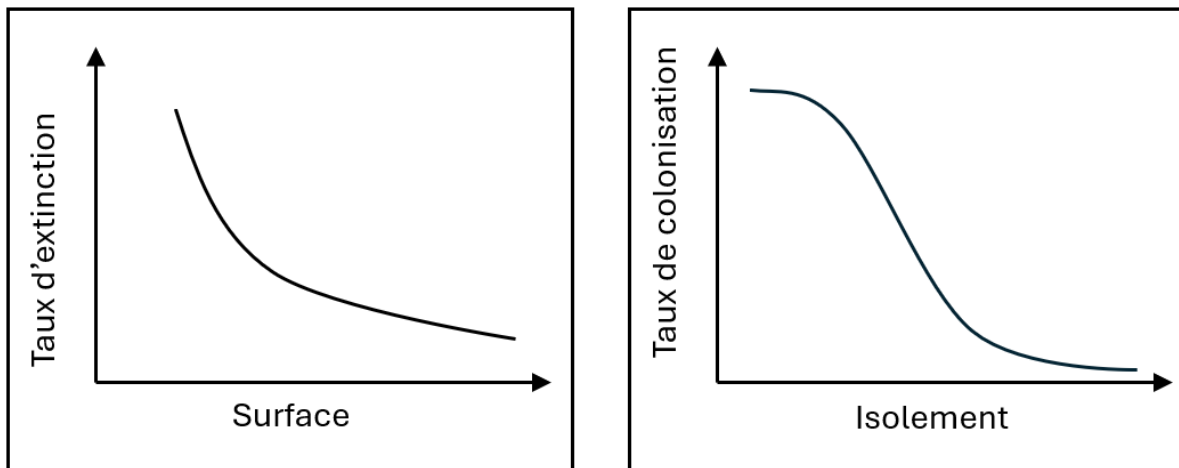


Figure 2: Taux d'extinction et de colonisation, les deux facteurs régissant la persistance d'une population au sein du paysage. Auteur : WYNANTS Julien, inspiré de Harchies et al., 2018

L'évolution du concept de réseau écologique contribue à un processus de conservation plus large, ne se résumant plus à une protection d'espèces et de sites exceptionnels mais bien à une structure spatiale cohérente dans le paysage (Jongman, 1995). En effet, l'isolement d'une réserve ne contribue pas efficacement à préserver la métapopulation, offrant seulement un refuge temporaire pour une population locale (Opdam, 1991). Cependant, au vu des dynamiques de dispersion et de renouvellement de la population, cette préservation n'est pas efficace sur le long terme. L'apport des théories de la biogéographie insulaire et des métapopulations ont permis une approche plus chorologique (Battisti, 2003), c'est-à-dire qui étudie la distribution spatiale des espèces (animales et végétales), que topologique. Le réseau écologique peut dès lors se résumer à deux mots : surface et connectivité. Ces mots sont applicables à n'importe quelle échelle spatiale d'analyse.

1.3. Mise en avant des trames

Le concept de réseau écologique est large. Dans le but de créer un réseau écologique, celui-ci est subdivisé en trames afin de travailler avec des habitats partageant des caractéristiques similaires. L'objectif est d'assurer une continuité écologique entre des réservoirs de biodiversité grâce à des corridors adaptés (Sordello, 2017). Ces trames thématiques permettent également une adaptation relative aux exigences écologiques et à la capacité de dispersion des espèces. Les milieux urbains et ruraux ont pu être connectés au réseau écologique grâce à l'arrivée des logiques de trames afin de relier les milieux naturels, semi-naturels et anthropisés

(Mander *et al.*, 2018). Cela permet d'ajouter la conservation des services écosystémiques aux objectifs du réseau. Les services écosystémiques sont importants puisqu'ils facilitent la compréhension des bénéfices offerts par la nature à la société humaine afin de mobiliser des investissements (Mander *et al.*, 2018).

Les trames les plus connues sont les vertes et bleues, respectivement en référence aux milieux terrestres et aquatiques. L'objectif est d'identifier et assurer la continuité écologique terrestre et aquatique en reprenant les principes de l'écologie du paysage (Sordello *et al.*, 2022). Toutefois, ce ne sont pas les seules trames existantes dans la littérature. Tiwary & Kumar (2014) développent le principe de trame grise qui se réfère aux éléments bâtis constituant l'espace urbain. Cette trame interagit avec les processus naturels et climatiques. De ce fait, l'infrastructure grise doit être prise en compte dans les stratégies de réseau écologique en intégrant les espaces naturels et semi-naturels qui existent au sein du milieu urbain. Ces espaces semis-urbains permettent une liaison entre la trame verte et la trame grise et de ces interactions découle un processus de synergie urbaine (Tiwary & Kumar, 2014). L'ensemble des sols et substrats compose une autre trame distincte qui est reliée avec les trames verte et grise. Cette trame dite brune, en référence aux sols, constitue un maillage en surface et souterrain des sols non artificialisés capables de contribuer à la résilience du milieu. En effet, les sols contribuent dans divers services écosystémiques comme l'infiltration des eaux pluviales ou le stockage de carbone mais contribuent tout autant pour la biodiversité, en étant un habitat et un corridor pour la faune et la flore (Pouyat & Trammell, 2010 ; Pouyat *et al.*, 2019). Selon Pouyat & Trammell (2010), les sols artificialisés peuvent également être inclus dans la trame brune car ils continuent de fournir des services écosystémiques. Bien que l'efficacité soit moindre, cette inclusion vise à reconnaître et préserver les fonctions pédologiques, biologiques et hydrologiques que le sous-sol urbain peut assurer.

Un exemple parlant de trame est celui de la Trame verte et bleue en France. Cette trame naît avec les différentes lois Grenelle de l'environnement entre 2007 et 2009 (Sordello *et al.*, 2022) et est mise en œuvre à trois échelles territoriales distinctes. L'échelle nationale fixe les objectifs principaux, l'échelle régionale identifie les continuités écologiques régionales et les mesures de préservation et de restauration et l'échelle locale permet d'intégrer les enjeux locaux (Sordello, 2017, Sordello *et al.*, 2022).

Il est intéressant de noter que tout milieu représente une opportunité de créer une trame. L'espace aérien est par exemple cité pour être intégré dans la trame verte à travers une trame aérienne (Sordello *et al.*, 2022).

2. L'émergence de la nuit comme enjeu

Le cycle jour/nuit régule les périodes d'activités des êtres vivants, qu'ils soient diurnes ou nocturnes. La nuit est une part importante de ce cycle. Dans ce chapitre, le rapport de l'Homme à la nuit sera introduit, ainsi que le concept de pollution lumineuse. Ensuite, les enjeux de la nuit seront présentés séparément pour la biodiversité et l'Homme. Enfin, la reconnaissance du ciel étoilé ainsi que le cadre législatif en Europe et en Belgique seront évoqués.

L'Homme est une espèce diurne et en conséquence, a cherché dès que possible à rendre l'obscurité visible. Eclairer la nuit a pour objectif de se protéger en permettant de voir et d'être vu. La peur de l'obscurité et de ses dangers représente le facteur déterminant du développement des systèmes d'éclairage (Mosser, 2007). Dès le début, éclairer la nuit est associé à des besoins et valeurs sociales (Stone, 2017) ainsi qu'au progrès (Dunn, 2020). Une fois sédentarisées, les populations ont éclairé autour d'elles. L'éclairage public contemporain se développe à partir du XVI^e siècle. L'éclairage s'inscrit tout d'abord dans une logique d'embellissement et d'ordonnancement de l'espace urbain. Ensuite, vers le XVIII^e siècle, l'éclairage public s'inscrit principalement dans des logiques sécuritaires afin de permettre aux forces de l'ordre de voir et interpellier (Mosser, 2007). Le principe de surveillance devient plus passif avec le temps, reposant sur le principe que l'éclairage public permet à tous les citoyens de surveiller les rues. Avec le développement des lampes électriques et celui de la voiture et du réseau routier, le paysage nocturne connaît un profond changement sur une large échelle spatiale (Longcore & Rich, 2004 ; Falcón *et al.*, 2020) tout en maintenant en avant la thématique de la sécurité (Mosser, 2007). Désormais, l'usage de la lumière artificielle est étendu à toutes les activités humaines, permettant de s'extraire du cycle naturel, tout en offrant des opportunités de publicités ou de mise en valeur (Stone, 2017 ; Falcón *et al.*, 2020).

Le niveau de pollution lumineuse devient également un reflet du progrès et de l'urbanisation (Huang *et al.*, 2023). Le défi principal de la pollution lumineuse est qu'elle est inéluctable, ce qui nécessite une compréhension maximale afin de contrôler au mieux l'éclairage de nuit. Falchi *et al.* (2011) définissent la pollution lumineuse comme « *l'altération des niveaux naturels de lumière dans l'environnement nocturne produit par l'introduction de lumières artificielles* ». De plus, cette pollution croît globalement, en moyenne, de 6 % par an selon Hölker *et al.* (2010). L'enjeu est de réguler l'implantation de points lumineux car l'offre est souvent supérieure aux besoins établis (Huang *et al.*, 2023). Les solutions pour réduire la

pollution lumineuse représentent également une facette paradoxale de ce phénomène. En effet, elles sont simples et économiques mais pourtant peu mobilisées. De plus, l'ajout de cette pollution a perturbé le cycle naturel de la lumière, considéré comme constant et avec lequel toutes les espèces évoluent depuis toujours (Gaston *et al.*, 2013).

L'empreinte de l'Homme sur le paysage ne se résume pas à une modification physique de ce dernier. En effet, la lumière artificielle durant les nuits a également de nombreux impacts sur la biodiversité ainsi que sur la santé humaine. Une volonté politique générale d'assurer le sentiment de sécurité des citoyens a également largement contribué au développement du réseau d'éclairage.

Dans la littérature scientifique, le concept de pollution lumineuse émerge vers les années 1970 (Stone, 2017) et est généralement citée sous le nom de ALAN (Artificial light at night). Selon Hao *et al.* (2023), les articles les plus anciens repris dans Web of Science sur le sujet datent de 1998, connaissant une production relative jusqu'en 2011 où le nombre moyen de publications par an atteint 10,33. La période 2012 – 2022 connaît une croissance bien plus élevée avec 112 articles par an. Entre 2006 et 2011, les thèmes de prédilection étaient les impacts sur la santé et l'écologie. La tendance est restée identique par après mais avec l'apparition de nouvelles approches comme la télédétection et la législation. L'intérêt croissant de la pollution lumineuse dans les recherches scientifiques est confirmé par Rodrigo-Comino *et al.* (2023), qui ajoutent que ce sont les pays fortement urbanisés (Etats-Unis, Chine, Royaume-Uni, ...) qui contribuent le plus aux recherches. Cela prouve bien la reconnaissance de ce sujet et la prise de conscience de l'enjeu.

Wang *et al.* (2023) ont modélisé l'évolution de la pollution lumineuse dans deux villes chinoises sur base d'indicateurs comme la couverture végétale, l'emprise des rivières, de la zone résidentielle et industrielle ou encore le nombre de points lumineux. Les résultats démontrent l'influence des choix politiques de l'aménagement du territoire sur l'évolution de cette pollution. À l'échelle mondiale, la perte des services écosystémiques liée à la pollution lumineuse est estimée à 3,4 trillions de dollars américains par an. Cette valeur est déterminée en considérant la pollution lumineuse comme une dégradation du sol affectant les estimations de la valeur des services écosystémiques (Anderson *et al.*, 2024).

2.1. Pollution lumineuse ou nuisance ?

Au cours de l'introduction de ce chapitre 2, le terme de « pollution lumineuse » a été cité à plusieurs reprises. Il est donc essentiel de comprendre pourquoi les auteurs s'accordent sur ce terme au détriment du terme de nuisance. Selon Faburé *et al.* (2022), la pollution se définit comme « *une altération de l'environnement par des substances (naturelles, chimiques ou radioactives), des déchets (ménagers ou industriels) ou des nuisances diverses (sonores, lumineuses, thermiques, biologiques, etc.)* ». Cette définition associe la pollution à une dimension temporelle étendue et à des perturbations mesurables, qui dépassent les fluctuations naturelles, tout en engendrant un tort réel à l'environnement. De son côté, Ramade (2022) caractérise la nuisance comme suit : « *toute dégradation de l'environnement ayant pour conséquence d'induire une gêne pour les personnes qui la subissent* ». Sous cet angle, la nuisance est anthropocentrée et repose sur une perception immédiate, sans nécessairement de lien direct avec des dommages durables pour la santé ou les écosystèmes.

Plusieurs points de divergence distinguent nuisance et pollution. Tout d'abord, l'échelle spatio-temporelle des effets négatifs qui les accompagnent. Les nuisances ont des effets immédiats ou à court terme et dans une zone localisée, à l'inverse de la pollution dont les impacts se mesurent sur un plus long terme et une échelle spatiale plus large. Ensuite, les modalités de traitement. Des seuils de confort ou d'acceptabilité sont définis et appliqués afin de réduire des nuisances, alors que la pollution nécessite de revenir à un état jugé naturel.

Le choix du terme pollution ou nuisance est donc accompagné de nuances essentielles à la bonne compréhension des enjeux mis en avant dans ce travail. Challéat & Lapostolle (2014) soulignent que ces différences idéologiques se retrouvent chez les environmentalistes qui considèrent la lumière artificielle comme une perturbation de l'environnement naturel (la nuit sombre) et chez des techniciens qui qualifient ces problématiques de nuisances. En France, la confrontation entre environmentalistes et techniciens se perçoit bien par le biais des remarques de l'Association française de l'éclairage et de l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (ANPCEN). La première explique que la lumière artificielle peut être à l'origine de nuisances mais n'est pas une pollution car la lumière ne pollue pas, son traitement n'est pas long et unique à l'instar de la pollution de l'eau par exemple. Selon l'AFE, « *dès que la lumière cesse, ses nuisances éventuelles disparaissent* » (Remande, 2010). L'ANPCEN rétorque que la lumière artificielle émise en excès en dehors des zones nécessitant de l'éclairage altère l'environnement nocturne en perturbant notamment le

cycle jour-nuit, ce qui impacte de ce fait, aussi bien l'Homme que la faune et la flore (Challéat & Lapostolle, 2014).

Cette controverse dans le choix des appellations traduit avant tout deux visions du monde portées par des idéologies différentes. D'un côté, la « nuisance lumineuse » est perçue comme un inconfort ponctuel dont l'effet disparaît dès que la lumière est coupée et que la population retrouve son confort. De plus, la lumière est naturelle et immatérielle et ne saurait être un polluant en soi. Pourtant, la lumière artificielle mise en œuvre par nos réseaux d'éclairage urbains diffère profondément de la lumière naturelle, tant par son intensité que par sa signature spectrale. Pour cette raison, et pour mieux circonscrire le phénomène étudié, il convient donc désormais de distinguer explicitement les « lumières artificielles de nuit » (ALAN) du reste du flux lumineux, afin de se concentrer sur la pollution lumineuse telle qu'elle impacte les écosystèmes.

Ainsi, de nombreux auteurs ont apporté une définition de la pollution lumineuse afin de justifier l'appellation. Selon Mouglin *et al.* (2021) cité par Faburé *et al.* (2022) « *les pollutions lumineuses correspondent à la présence d'une source lumineuse dans un milieu qui naturellement n'en présente pas ou le fait d'un excès nocturne de source lumineuse, conduisant à des perturbations des organismes vivant dans les écosystèmes concernés. Cela concerne surtout des perturbations des rythmes biologiques et des activités nocturnes. Cela peut aussi avoir un effet sur les déplacements d'espèces comme les migrations ou cela peut amener au rapprochement d'espèces proches de zones urbaines qui ne sont pas leurs aires de vie habituelle* ». Longcore & Rich (2004) différencient la pollution lumineuse astronomique qui se rapporte à la dégradation de la vision humaine des corps célestes, de la pollution lumineuse écologique. Cette pollution correspond « *à la lumière artificielle qui altère les cycles naturels de la lumière et de l'obscurité au sein des écosystèmes* » (Longcore & Rich, 2004). Pour Falchi *et al.* (2011), la pollution lumineuse est « *l'altération des niveaux naturels de lumière dans l'environnement nocturne produit par l'introduction de lumières artificielles* ». Cette définition sous-entend que le terme de pollution lumineuse requiert des seuils. Les auteurs convergent vers l'idée que la pollution lumineuse correspond à la présence ou à l'excès de lumière artificielle dans un milieu naturellement sombre, perturbant les écosystèmes.

En conclusion, le choix du terme nuisance ou pollution dépend de l'approche et des objectifs visés par le travail. Challéat (2011) explique que la lumière artificielle peut être considérée comme une nuisance car elle ne dégrade pas directement le ciel nocturne mais empêche son observation. Dès que les niveaux d'éclairages sont réduits, l'observation s'en retrouve

directement améliorée. Néanmoins, si le paysage nocturne « sombre » est considéré comme un capital naturel, sa dégradation provoque un appauvrissement des milieux par le biais de perturbation des déplacements ou de l'alimentation par exemple. La lumière artificielle nécessite alors un traitement sur les sources lumineuses mais aussi des traitements sur le long terme comme la réintroduction d'espèces dans des milieux dégradés ou médicaux pour l'Homme. Selon Azam *et al.* (2016), certaines de chauves-souris modifient leurs habitudes de chasse pour converger vers les points lumineux qui attirent les insectes. Néanmoins, l'attraction des insectes peut entraîner une réduction du nombre d'individus. De plus, les espèces insectivores qui évitent l'éclairage perdent une partie de leurs proies potentielles. Dès lors, l'objectif de ce travail étant d'observer les impacts de la lumière artificielle de nuit sur la biodiversité ainsi que la mise en place d'une méthodologie afin de créer une trame noire, nous considérons la lumière artificielle comme une pollution. Ce terme, à l'inverse de nuisance, renvoie non seulement à l'écart permanent par rapport aux niveaux naturels de lumière, mais aussi à la nécessité d'un traitement environnemental durable, à l'image des démarches de restauration écologique.

2.2. Enjeu biodiversité

La pollution lumineuse écologique affecte de nombreux processus de la vie animale, comme la prédation, la reproduction, la nutrition, la communication, la migration ou encore la compétition (Longcore & Rich, 2004 ; Falcón *et al.*, 2020 ; Levin *et al.*, 2020 ; Huang *et al.*, 2023 ; Rodrigo-Comino *et al.*, 2023). Globalement, cette pollution peut se décomposer en trois effets : l'éblouissement direct, l'augmentation chronique de l'éclairage et les fluctuations temporaires de l'éclairage (Longcore & Rich, 2004). Près de 30 % des vertébrés et plus de 60 % des invertébrés sont nocturnes, ce qui implique une prise en considération majeure de la pollution lumineuse (Laforge *et al.*, 2019).

Les espèces nocturnes présentent également une sensibilité plus élevée à la lumière que l'être humain ainsi qu'une sensibilité spectrale différente, rendant la pollution lumineuse plus impactante (Longcore & Rich, 2004 ; Gaston *et al.*, 2013 ; Falcón *et al.*, 2020). La majorité de l'activité nocturne est effectuée dans une période de « semi-obscurité biologiquement utile », profitant des faibles niveaux lumineux apportés par la lune (Gaston *et al.*, 2013). L'apport de nouvelles sources lumineuses peut déclencher d'autres comportements associés à des intensités

supérieures, empêchant la réalisation d'activités nécessaires à la survie de l'espèce. Les changements d'intensité dans l'éclairage sont également un élément perturbant la biodiversité. Un changement rapide peut entraîner l'aveuglement temporaire, allant de quelques minutes à quelques heures (Longcore & Rich, 2004). La biodiversité a généralement deux façons distinctes de réagir face à la lumière. Soit elle est attirée, soit elle est repoussée (Longcore & Rich, 2004). Les insectes volants nocturnes, par exemple, sont attirés par les points lumineux et y restent piégés jusqu'à épuisement (Longcore & Rich, 2004 ; Huang *et al.*, 2023), amenant à un changement dans la distribution spatiale des populations (Falcón *et al.*, 2020). Certains prédateurs modifient dès lors leurs habitudes de chasse et restent près des sites éclairés. Les espèces utilisant la bioluminescence pour localiser leur partenaire d'accouplement sont également moins capables de se retrouver entre elles, entraînant un déclin de ces espèces (Gaston *et al.*, 2013).

Tout cela amène à des modifications du temps d'activités des espèces nocturnes, diurnes ou crépusculaires. En effet, l'ajout d'éclairage permet aux espèces diurnes et crépusculaires d'étendre leur période d'activité, à l'inverse des espèces nocturnes qui réduisent leurs activités tout en voyant leurs habitats se dégrader (Longcore & Rich, 2004 ; Gaston *et al.*, 2013 ; Sanders *et al.*, 2023). Néanmoins, il est important de préciser que ce sont des tendances générales, chaque espèce ayant ses particularités. Par exemple, la lumière seule peut ne pas être suffisante pour accéder à la niche écologique nocturne pour les espèces diurnes et crépusculaires. En effet, les températures plus froides de la nuit peuvent empêcher ou limiter l'activité de ces espèces (Sanders *et al.*, 2023). De plus, les espèces diurnes sont également impactées par la présence de lumières artificielles qui perturbent leur sommeil, conduisant certaines d'entre elles à commencer ou terminer leurs activités plus tôt ou plus tard (Aulsebrook *et al.*, 2018). L'éclairage artificiel modifie donc les déplacements de la faune en termes de fréquence, de temporalité et de but (Sordello, 2017).

Les oiseaux migrateurs peuvent être désorientés par les bâtiments éclairés, perturbant leurs déplacements et leur alimentation (Huang *et al.*, 2023 ; Rodrigo-Comino *et al.*, 2023). La capacité de migration des oiseaux repose sur la magnétoréception et la détection de la lumière des corps célestes, deux mécanismes pouvant être perturbés par la lumière artificielle. La magnétoréception s'appuie partiellement sur les longueurs d'ondes vertes et bleues. Certaines longueurs d'onde, comme le rouge, désorientent la direction migratoire, tandis que l'éclairage artificiel pourrait aussi altérer les repères lumineux naturels utilisés pour calibrer leur boussole interne (Gaston *et al.*, 2013). Poot *et al.* (2008) suggéraient déjà d'adapter la composition

spectrale des lumières artificielles pour réduire leur impact, bien que la désorientation dépende également de l'intensité lumineuse (Gaston *et al.*, 2013). Une fois attirées, certaines espèces restent piégées sur le site éclairé, n'en sortant qu'une fois le jour venu si elles en sont capables (Longcore & Rich, 2004). Les oiseaux ne sont pas les seuls à être désorientés. Nous pouvons également citer les tortues marines sortant de leur œuf. En effet, l'éclairage présent sur les plages désoriente les nouveau-nés qui s'orientent naturellement vers la source la plus lumineuse, qui est supposée être la Lune. Lorsque la pollution lumineuse est trop importante, les lampadaires placés aux abords des plages se substituent à la Lune et attirent les nouveau-nés (Longcore & Rich, 2004). Les espèces de zones humides ou aquatiques sont également impactées dans leurs déplacements et la reproduction (Huang *et al.*, 2023), certaines étant moins sélectives dans le choix de leur partenaire lorsque la quantité de lumière augmente. Ce choix est motivé par les risques de prédation qui augmentent, favorisant un choix rapide (Longcore & Rich, 2004).

Les chauves-souris sont une des espèces les plus emblématiques de la nuit et de surcroît, vulnérables, étant nocturnes. Néanmoins, cette vulnérabilité est à nuancer en fonction des espèces et de leurs caractéristiques respectives. Les espèces dont le vol est lent et chassant à l'affût comme les *Myotis spp.* et les *Rhinolophus spp.* évitent les zones éclairées (Azam *et al.*, 2016 ; Laforge *et al.*, 2019). En effet, leur technique de chasse repose sur le fait de suivre la proie silencieusement jusqu'à ce qu'elle s'arrête et de l'attraper à ce moment-là. À l'inverse, les *Pipistrellus spp.* et les *Nyctalus spp.* chassent leurs proies dans les airs avec un vol rapide. De ce fait, la pollution lumineuse apporte de nouvelles opportunités de zones de chasse prédictibles (Azam *et al.*, 2016 ; Laforge *et al.*, 2019). Les espèces fuyant la lumière se retrouvent alors avec une fragmentation aggravée de leur habitat ainsi que moins de proies disponibles sur leurs sites de chasse (Longcore & Rich, 2004 ; Azam *et al.*, 2019 ; Sanders *et al.*, 2023). Une étude réalisée sur des *Pipistrellus pipistrellus* a démontré que dans un environnement urbain, les pipistrelles sont moins affectées par la lumière tant qu'elles restent sous un couvert arboré. Lorsqu'elles quittent cette protection, le niveau d'intensité de la lumière artificielle augmente grandement la résistance au déplacement, indépendamment de la distance à traverser (Hale *et al.*, 2015). Néanmoins, la pollution lumineuse n'a pas que des aspects positifs pour les espèces à vol rapide car la perte de connectivité à l'échelle du paysage ainsi que la réduction d'espaces suffisamment sombres pour la reproduction impactent toutes les espèces de chauves-souris (Azam *et al.*, 2016). Selon Falcón *et al.* (2020)

et Rodrigo-Comino *et al.* (2023), les lumières de mise en valeur de sites comme les clochers d'églises sont un problème majeur pour les espèces de chauves-souris nichant dans ces sites.

La pollution lumineuse amène donc une fragmentation de l'habitat, empêchant les espèces animales de se déplacer de part et d'autre de cet espace.

En conclusion, l'ALAN perturbe le milieu nocturne de façon temporelle, quantitative et qualitative (Falcón *et al.*, 2020). Les espèces nocturnes, diurnes et crépusculaires sont impactées, perturbant les interactions entre elles à travers leurs opportunités de déplacement ou les changements dans le temps d'activité.

2.3. Enjeu humain

Selon Falchi *et al.* (2016), 83 % de la population mondiale vit sous un ciel pollué par la lumière artificielle (considérant au minimum une augmentation de 8% par rapport à la lumière naturelle), entravant l'observation des étoiles et autres objets célestes naturels. Les astronomes sont parmi les premiers à avoir constaté la dégradation du ciel nocturne (Cinzano & Falchi, 2013 ; Ji *et al.*, 2024). En effet, certains observatoires relevaient déjà une dégradation dans les années 1930 (Levin *et al.*, 2020). D'ailleurs, Longcore & Rich (2004) précisent que la pollution lumineuse astronomique représente le manque de visibilité des corps célestes et étoiles et est à séparer de la pollution lumineuse écologique. À l'échelle des Etats-Unis et de l'Europe, le pourcentage grimpe même jusqu'à 99 %. De ce fait, l'éclairage nocturne amène des perturbations du cycle circadien (Huang *et al.*, 2023 ; Rodrigo-Comino *et al.*, 2023 ; Ji *et al.*, 2024). Ces perturbations peuvent mener à une diminution des taux de mélatonine et par conséquent impacter négativement le sommeil (Falchi *et al.*, 2011 ; Levin *et al.*, 2020), menant encore une fois à d'autres perturbations. En effet, un manque de sommeil impacte l'apprentissage, le développement ou encore la mémoire (Aulsebrook *et al.*, 2018). La production de mélatonine est stimulée par l'obscurité. La présence de lumière, surtout émise dans le bleu, inhibe la synthèse de cette hormone (Gaston *et al.*, 2013 ; Aulsebrook *et al.*, 2018). Certaines études associent également l'usage de lumières artificielles avec le diabète ou certains types de cancers (Cinzano & Falchi, 2013). Cependant, les impacts ne sont pas encore pleinement mesurés, que ce soit pour la santé humaine ou pour la santé du reste du vivant (Rodrigo-Comino *et al.*, 2023).

L'éclairage nocturne demeure également fortement associé à la réduction des actes criminels, à l'amélioration de la sécurité dans les espaces publics et les transports, ainsi qu'à la mise en valeur du territoire. Ces perceptions s'expliquent en partie par des dynamiques historiques citées ci-dessus (Mosser, 2007). Plusieurs travaux ont par ailleurs étudié l'impact de l'éclairage sur la sécurité routière. Wanvik (2009) met en évidence un effet positif de l'éclairage sur la diminution des accidents, un effet qui semble plus marqué en milieu rural qu'en milieu urbain. L'éclairage contribue également à limiter les risques de collision impliquant des piétons dans les zones rurales, bien que leur sécurité dépende également d'autres variables. À titre d'exemple, une route rectiligne faiblement éclairée peut s'avérer plus dangereuse qu'une route sinueuse présentant un niveau d'éclairement équivalent. Des dispositifs d'éclairage adaptatif, comme les accessoires rétro réfléchissants, semblent offrir une amélioration de la sécurité des piétons plus significative que l'éclairage fixe (Sullivan et al., 2010). De plus, Bullough *et al.* (2013) notent que les routes éclairées de nuit peuvent présenter une sécurité légèrement supérieure à celles empruntées en journée. Ce constat est également formulé par Donnell *et al.* (2010), en particulier dans le contexte des intersections routières. Ces deux études nuancent toutefois l'importance de l'éclairage dans la sécurité routière : bien qu'il joue un rôle incontestable, son effet semble inférieur à la réduction de 30 % des accidents souvent rapportée par des publications antérieures. En effet, il convient de replacer l'éclairage dans un ensemble plus vaste de facteurs déterminants, tels que la géométrie des infrastructures, la présence de passages pour piétons, les comportements des usagers ou encore les conditions météorologiques. En ce sens, malgré une corrélation entre la luminance et le ressenti de sécurité, le lien de causalité demeure partiellement incertain (Marchand, 2019).

Par ailleurs, la diminution de l'éclairage urbain, qu'il s'agisse d'une baisse d'intensité ou d'une extinction partielle, ne semble pas engendrer une augmentation du nombre d'accidents ou de faits criminels (Steinbach *et al.*, 2015 ; Tompson *et al.*, 2023). L'éclairage public conserve cependant un effet préventif vis-à-vis de la criminalité. En facilitant une fréquentation accrue des espaces publics, il accroît les risques perçus par les délinquants potentiels, tout en renforçant le sentiment de sécurité des usagers. De plus, les investissements en éclairage peuvent être perçus comme des signes d'attention des pouvoirs publics, stimulant la confiance des habitants envers leur quartier et favorisant des formes de surveillance informelle entre voisins (Mosser, 2007). Néanmoins, les ajustements de l'éclairage public peuvent engendrer un déplacement spatial et temporel des activités criminelles (Welsh *et al.*, 2022 ; Tompson *et al.*, 2023), sans nécessairement en réduire la fréquence globale.

Pour ce qui est du sentiment de sécurité, la vision « le plus lumineux est le mieux » n'est pas réaliste. En effet, le sentiment de sécurité peut déjà être maintenu avec une luminance relativement faible. À partir de ce seuil, dépendant du contexte local, une augmentation de la luminance contribuera de moins en moins à accroître le sentiment de sécurité général (Svechkina et al., 2020). De plus, en privilégiant des couleurs plus chaudes et en uniformisant le parc d'éclairages, il est possible de conserver le sentiment de sécurité de la population tout en réalisant des économies énergétiques et budgétaires au niveau de la municipalité (Saad et al., 2021). La couleur de l'éclairage influence également l'éblouissement. Les longueurs d'ondes courtes comme le bleu occasionnent un éblouissement plus fort que les plus grandes longueurs d'ondes (Bullough, 2009).

Cette ambiguïté sur les avantages et désavantages de l'éclairage est une pièce centrale du défi que représente la pollution lumineuse. De plus, cette pollution présente également d'autres effets négatifs car elle entraîne une perte monétaire et énergétique qui se compte en milliards de dollars (Stone, 2017).

En conclusion, la figure 3 présente schématiquement les causes de la pollution lumineuse, ses principales dimensions ainsi que ses impacts différenciés sur l'être humain et la biodiversité.

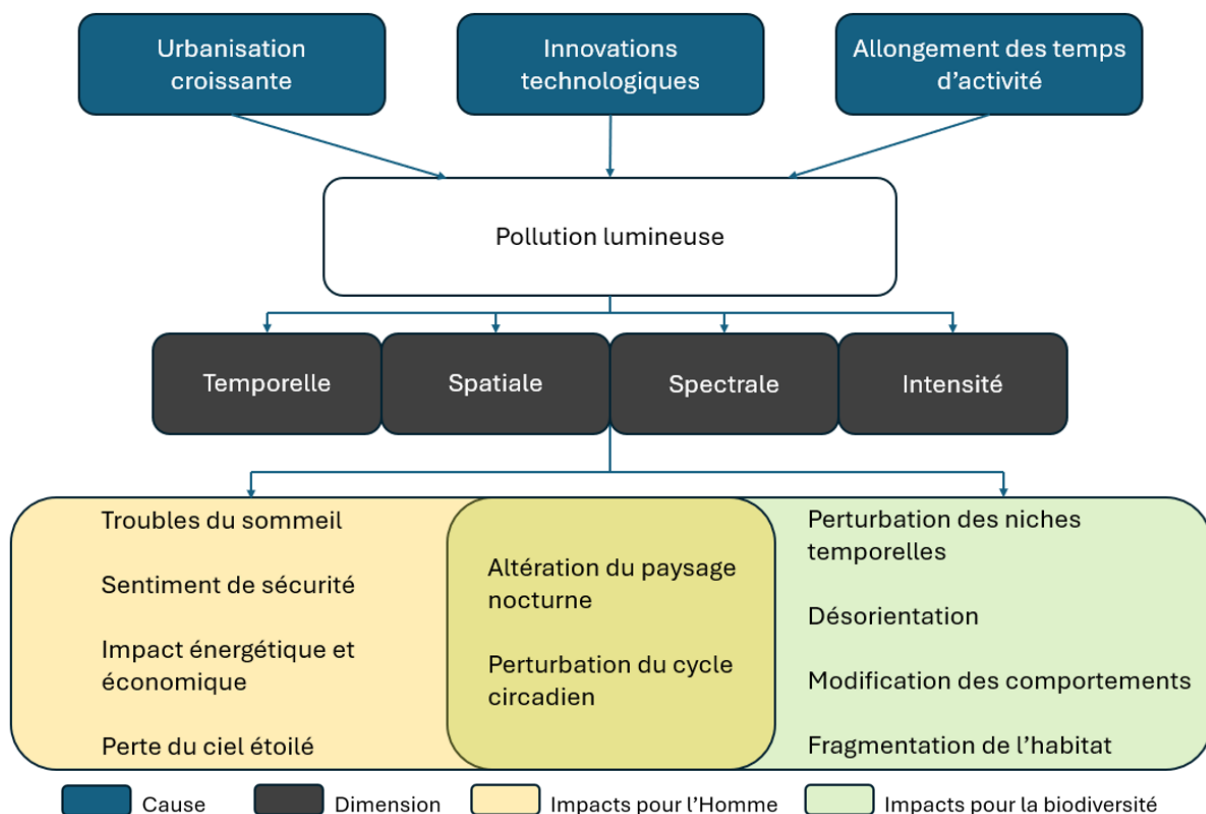


Figure 3 : Résumé schématique des causes et des impacts généraux associés à la pollution lumineuse. Auteur : WYNANTS Julien, 2025

2.4. La reconnaissance du ciel étoilé et de la pollution lumineuse

La reconnaissance du ciel étoilé est une étape essentielle pour valoriser ce patrimoine et ainsi, le protéger.

Dès 1992, l'UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture) reconnaît le ciel nocturne étoilé comme faisant partie du patrimoine mondial à préserver ainsi que l'impact de la pollution lumineuse sur ce patrimoine (Bompard, 2020).

En 2007, la Déclaration Starlight est rédigée lors d'une conférence internationale sur la défense de la qualité de la nuit. La déclaration rassemble de nombreux acteurs internationaux comme l'UNESCO, l'OMT (Organisation mondiale du tourisme), le PNUE, la Commission Européenne ou encore l'UAI (Union astronomique internationale). Cette déclaration affirme que le droit à un ciel nocturne non pollué est inaliénable et que la dégradation de sa qualité constitue une perte fondamentale. Dès lors, la préservation de ce patrimoine est essentielle, en passant par la diffusion de l'astronomie dans l'éducation et par la protection des zones propices à l'observation scientifique. L'usage de l'éclairage artificiel doit également être régulé et plus stratégique. Enfin, le tourisme nocturne peut être une opportunité afin de valoriser la ressource qu'est le ciel étoilé et ainsi, de le protéger (Starlight Initiative, 2025). Le label Starlight Reserve est créé par la suite. L'objectif est de préserver la qualité du ciel nocturne et les valeurs qui y sont associées.

À l'échelle internationale, DarkSky International (IDA) (anciennement International Dark-Sky Association) a également développé son programme *International Dark Sky Places* en 2001 dans le but de promouvoir des espaces au ciel nocturne exceptionnel. Ce programme certifie des zones de ciel sombre conservées et propose cinq types de certification, dont des réserves et des parcs, avec différents standards et critères et à différentes échelles (DarkSky International, 2024). Dans le cadre de ce programme, l'association a notamment certifié 23 réserves de protection du ciel étoilé. L'association travaille également avec les autorités pour des projets de législation sur les façons d'éclairer efficacement.

Néanmoins, le comité du Patrimoine mondial de l'UNESCO ne reconnaît pas les réserves Starlight et les parcs Dark Sky de l'IDA comme des biens du patrimoine mondial car il n'existe pas actuellement des critères de reconnaissance suffisants (UNESCO, 2020).

En France, l'ANPCEN œuvre pour la préservation de la qualité du ciel nocturne. L'association encourage les collectivités à différentes échelles à adopter des pratiques respectueuses de l'environnement nocturne. C'est dans cette optique que l'ANPCEN propose le label « Villes et Villages étoilés » afin de valoriser les collectivités impliquées. Ce label est national et attribué à chaque participant reconnu une à cinq étoiles en fonction de la qualité du ciel et de l'environnement. Afin de continuer à impliquer les participants, ce score peut être amélioré au travers des différentes éditions. Le concours de 2024 a été organisé avec le soutien de partenaires institutionnels tels que le Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires ou l'Office français de la biodiversité (ANPCEN, 2024).

Des associations existent également en Belgique et elles couvrent l'ensemble du territoire. En Flandre, l'association majeure est Leve(n) de Nacht qui succède à l'association Preventie Lichtinder. Les objectifs principaux sont la sensibilisation, la recherche ainsi que l'offre de services de conseil et de formation (Leven de Nacht, 2025a). De plus, depuis 2024, l'association est devenue le représentant de l'IDA en Belgique. L'action phare de l'association est la Nuit de l'Obscurité qui est organisée en Flandre chaque année depuis 1995 (Leven de Nacht, 2025b). Cette action de la Nuit de l'Obscurité est également organisée au sud du pays et dans la région de Bruxelles-Capitale par l'Association pour la sauvegarde du ciel et de l'environnement nocturnes (ASCEN) depuis 2007 (ASCEN, 2025). Les principaux objectifs de cette association sont d'informer le grand public ainsi que les responsables politiques à travers des campagnes d'informations.

2.5. La législation européenne et belge

Il n'existe pas de législation spécifique contre la pollution lumineuse au niveau européen (Schroer *et al.*, 2020). La réglementation actuelle est également difficile à appliquer à la pollution lumineuse et est spécifique, se concentrant sur certaines espèces et certains habitats, laissant la majorité de la faune et de la flore vulnérable. De plus, les directives Habitats et Oiseaux ne mettent pas directement en avant la pollution lumineuse comme une pression majeure pour la biodiversité. Cependant, ces directives imposent aux Etats de prendre les mesures nécessaires pour empêcher toute perturbation potentielle. De ce fait, la Cour européenne de Justice a considéré en 2006 que la Grèce n'avait pas protégé suffisamment les plages servant de site de reproduction pour les tortues de la pollution lumineuse (Jägerbrand & Bouroussis, 2021).

Malgré le manque de législation à l'échelle européenne, certains pays se sont dotés de textes prenant en compte la pollution lumineuse. La République tchèque en 2002 devient le premier pays au monde à se doter d'une loi à ce sujet. Le texte oblige les citoyens et les organisations à prendre les mesures nécessaires afin d'empêcher toute forme d'illumination artificielle de dépasser les limites de la zone devant être éclairée (Manfroid, 2002). En France, le Grenelle de l'environnement de 2007 impose des prescriptions en termes de gestion de l'éclairage la nuit afin de limiter et prévenir les nuisances lumineuses (Sordello *et al.*, 2021). À partir de cette loi, la France renforce sa législation sur le sujet à travers les lois Grenelle de 2009 et 2010 qui inscrivent les principes du Grenelle de 2007 au sein du code de l'environnement. Le terme de pollution lumineuse remplace totalement celui de nuisances lumineuses dans les textes à partir de 2010. Plusieurs décrets et arrêtés s'enchaînent également les années suivantes afin d'encadrer l'éclairage nocturne du bâti non résidentiels et les enseignes lumineuses. Enfin, la France intègre dès 2016 la gestion de la lumière artificielle au sein de la trame verte et bleue ainsi que la notion de pollution lumineuse sous-marine dans la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (Loi n° 2016-1087) (Sordello *et al.*, 2021).

Du côté de la Belgique, l'enjeu est légalement moins développé malgré le fait qu'elle soit bien connue pour son réseau routier éclairé toute la nuit. D'un point de vue légal, l'Etat belge n'a pas de loi sur la pollution lumineuse. Les standards sont définis par deux normes. La première, NBN L18-004 :2023, est publiée par l'Institut belge de l'éclairage (IBE-BIV, 2025) et précise les classes d'éclairage pour la voie publique et les différents types de voirie. Cette norme est étroitement liée avec la seconde norme : EN 13201. Cette norme européenne vise à garantir la sécurité et la visibilité sur les voies publiques, tout en minimisant l'impact de l'éclairage sur l'environnement (Van Der Ham, 2019). Parmi les trois régions qui composent la Belgique, seule la Région flamande mentionne la pollution dans un règlement environnemental nommé le VLAREM II. Ce règlement établit des conditions générales et sectorielles afin de limiter toute une série de nuisances environnementales. Ce texte intègre la réduction des émissions lumineuses pouvant affecter les activités astronomiques, la santé humaine et celle de la faune et de la flore (Gouvernement flamand, 1995).

La Wallonie est marquée par une pollution lumineuse significative et observable à travers des images satellites. La région compte environ 750 000 points d'éclairage public (Bebronne *et al.*, 2024), dont 80 % sont à charge des municipalités. Les compétences en matière d'éclairage public sont réparties entre deux niveaux de pouvoirs, à savoir la Région wallonne et les communes individuellement. Par conséquent, cela engendre une gestion de l'éclairage

hétérogène et dépendante des ressources, des stratégies locales ainsi que des besoins de chaque commune. De nombreux enjeux sont pris en considération afin de justifier les pratiques actuelles. Le passage progressif de l'éclairage aux lampes LED permet aux communes de réaliser d'importantes économies sur l'éclairage public qui représente presque 50 % de leur consommation énergétique (Bebronne *et al.*, 2024). L'enjeu économique est devenu encore plus important avec la hausse des coûts de l'énergie, amenant certaines communes à instaurer une extinction de l'éclairage entre minuit et 5h (Vanbéver, 2022). Cependant, l'arrivée des technologies LED correspond à une augmentation des points lumineux communaux, accroissant les impacts de la lumière sur la biodiversité (Bebronne *et al.*, 2024). La Wallonie a intégré également la problématique de la pollution lumineuse dans le plan environnement-santé ENVIEs de 2019-2023 (Wallonie environnement-santé, 2025). Toutefois, le plan développe peu la problématique en ne mentionnant que le Plan Lumière 4.0 comme action concrète pour agir en faveur d'éclairages mieux adaptés.

Pour ce qui est des infrastructures autoroutières, il existe des projets comme le Plan Lumière 4.0 réalisé en partenariat public/privé. Ce projet vise le remplacement de l'éclairage au sodium des autoroutes et des routes nationales par des lampes LED intelligentes, permettant de moduler l'intensité de l'éclairage. De plus, le Plan Lumière 4.0 comprend des mesures de préservation de la faune et de la flore dans les zones Natura 2000 proches du réseau routier comme un changement de température de la couleur des luminaires, la direction du flux lumineux vers la route ou encore l'extinction de l'éclairage. Ces mesures sont en application depuis le 1^{er} avril 2023 (SOFICO, 2025).

En Wallonie, la Province du Luxembourg a été la première à signer une charte « Province de Luxembourg, espace étoilé » rédigée en collaboration avec l'ASCEN et l'Observatoire Centre Ardenne (OCA) en 2019. À travers cette charte, la Province s'est engagée à intégrer dans ses cahiers des charges différents éléments favorables à la réduction de la pollution lumineuse. L'accent est mis sur l'éclairage intelligent qui permet une meilleure adaptation temporelle et contextuelle de l'éclairage ainsi qu'une optimisation des éclairages d'extérieur afin qu'ils n'éclairent que ce qui doit l'être. Les enseignes publicitaires ainsi que l'éclairage des monuments doivent être éteints pour 23h. Enfin, pour ce qui est de l'aménagement routier hors agglomération et zones d'intersections (ronds-points, carrefours), l'éclairage par matières réfléchissantes doit être privilégié (Ascen, 2019).

En conclusion, la législation concernant la pollution lumineuse varie énormément d'un pays à un autre en Europe. Certains pays affichent une volonté claire de reconnaître la pollution lumineuse comme une pression majeure pour la faune et la flore et ont inscrit cette pollution dans leur législation. La Belgique ne possède pas de telle loi et à l'échelle des Régions, seule la Flandre présente une réglementation sur le sujet.

3. Les trames noires dans la littérature scientifique

3.1. La conception d'une trame noire

L'intérêt croissant pour la pollution lumineuse a permis de mettre en évidence son importance pour la biodiversité et le paysage. Longcore & Rich (2004), considèrent que la pollution lumineuse est trop souvent négligée dans le design des réserves et corridors malgré le fait qu'elle représente une source de perturbations de la biodiversité sur de nombreux aspects. Le paysage nocturne est morcelé par les points lumineux, dégradant la connectivité du paysage. De ce fait, l'intégration de ce nouveau défi dans les réseaux écologiques est une suite logique du processus de recherche scientifique. Dès lors, mettre en place une trame noire demande de préserver et restaurer des réservoirs de biodiversité ainsi que des corridors remplissant les conditions nécessaires pour être intégrés, à savoir un niveau d'obscurité suffisant (Sordello *et al.*, 2021).

Le concept de trame noire est largement développé en France et permet d'intégrer la dimension temporelle ainsi que l'alternance jour/nuit dans les processus écologiques (Sordello *et al.*, 2021). Pour construire une trame noire, plusieurs approches sont proposées dans la littérature (Sordello, 2017 ; Sordello *et al.*, 2021). La première est une approche généraliste et opérationnelle se basant sur l'identification des zones de conflits entre l'éclairage artificiel et les zones à fort enjeu de biodiversité. Elle représente un outil d'aide à la décision afin de prioriser des actions de restauration ou de réduction de la pollution lumineuse sans réellement concevoir une trame complète. La seconde méthode construit une trame noire sur base du réseau écologique déjà existant sur le territoire étudié. Cette approche déductive superpose une cartographie de la pollution lumineuse et une cartographie du réseau existant afin de faire ressortir les zones présentant un niveau d'obscurité suffisant et qui sont incluses dans le réseau écologique. Bien qu'assez rapide à réaliser, cette méthode traite la pollution lumineuse comme

un critère secondaire et limite la trame noire aux contours du réseau présent, malgré l'existence d'autres zones sombres.

La troisième approche intègre la pollution lumineuse comme une source directe de fragmentation de l'habitat pour chaque sous-trame du réseau. Les réservoirs spécifiques sont identifiés à l'aide d'espèces indicatrices ainsi qu'avec la carte de la pollution lumineuse. Les corridors sont ensuite définis en modélisant les chemins optimaux en prenant en compte l'obscurité comme facteur de perméabilité écologique. Les différents corridors et réservoirs sont ensuite agrégés pour chaque sous-trame. Cette approche, dite intégrative, suit donc le processus classique de construction d'un réseau écologique en introduisant le cycle jour/nuit dans les éléments structurants (Sordello, 2017 ; Sordello *et al.*, 2021). Néanmoins, cette méthode peut négliger des espaces utiles pour la biodiversité diurne si ces derniers sont trop éclairés. Le résultat est alors un réseau écologique potentiellement plus limité qu'un réseau diurne.

Néanmoins, quel que soit la méthode utilisée, la logique reste similaire. Tout d'abord, l'emprise de la pollution lumineuse est évaluée, menant à la construction d'une trame lumineuse. Afin de réaliser cette trame lumineuse il est nécessaire d'imposer un seuil de luminosité. Les valeurs inférieures seront considérées comme ayant peu d'impact sur la biodiversité et celles supérieures seront considérées comme ayant un impact significatif. Dans la littérature, les chercheurs s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de valeur minimale normative permettant de distinguer les zones polluées. Les seuils dépendent du capteur ainsi que des objectifs de l'étude (Cinzano & Falchi, 2014 ; Falchi *et al.*, 2016 ; Sordello, 2017 ; Challéat *et al.*, 2021 ; Sordello *et al.*, 2021 ; Hao *et al.*, 2023 ; Sanders *et al.*, 2023). Par exemple, Falchi *et al.* (2016) évaluent le niveau de pollution par rapport à la lumière naturelle nocturne. Un ciel est considéré sans pollution si les valeurs observées sont inférieures à 1 % de la valeur naturelle nocturne. Ce ciel vierge est à protéger en priorité. Au-delà de 8 %, le ciel est pollué pour les mesures astronomiques. Néanmoins, une classification basée sur la détérioration de la qualité du ciel nocturne d'un point de vue astronomique ne semble pas transposable directement pour la construction d'une trame noire. Dès lors, les auteurs cités précédemment considèrent que toute lumière artificielle détectée par les instruments de mesure impacte directement la biodiversité.

3.2. Les sources de données exploitées

3.2.1. L'évolution des données satellitaires

Pour réaliser les observations de pollution lumineuse, les données utilisées sont généralement de deux types : satellitaire ou sur le terrain. Les données satellitaires proviennent de satellites comme le DMSP/OLS ou le SNPP VIIRS-DNB (Falchi *et al.*, 2016 ; Laforge *et al.*, 2019 ; Ji *et al.*, 2024). Le *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) représente le premier programme d'observation satellite permettant d'obtenir des données de nuit. En 1976, le programme lança un satellite contenant le *Operational Line-Scan System* (OLS), permettant de détecter des sources lumineuses émettant dans le visible et l'infrarouge proche durant la nuit. Alors que la résolution spatiale initiale était de près de 2,7 km (Levin *et al.*, 2020 ; Ji *et al.*, 2024), un archivage numérique en 1992 a permis d'affiner la résolution spatiale à 1 km. De plus, les images composites annuelles issues du DMSP/OLS sont disponibles pour la période 1992 – 2013. Les améliorations technologiques et méthodologiques dans le traitement des images ont permis de réduire la résolution grossière initiale de 2,7 km qui était liée avec des problèmes de saturation ainsi que des effets de floraisons (c'est-à-dire un débordement de la lumière sur des zones censées être non éclairées). Cela a permis d'améliorer la fiabilité des données produites (Levin *et al.*, 2020 ; Ji *et al.*, 2024). En 2011, c'est au tour du *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (SNPP) d'être lancé avec le capteur *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) afin de continuer la mission du DMSP/OLS. Ce nouveau capteur intègre un composant spécifiquement créé pour les mesures de nuit. Ce capteur panchromatique se nomme le Day/Night Band (DNB) et offre une résolution spatiale de 750 m, une résolution radiométrique plus large que son prédécesseur (Levin *et al.*, 2020 ; Ji *et al.*, 2024). Ce nouveau satellite construit une image globale de la Terre par jour, comme le DMSP/OLS (Elvidge *et al.*, 2017). Dès lors, des images journalières sont disponibles, ainsi que des composites mensuels, offrant plus d'opportunités de suivi. Néanmoins, le spectre bleu reste moins capté que le rouge et le vert par les capteurs du DMSP/OLS et du NPP/VIIRS. Ce qui est une vraie difficulté avec l'arrivée croissante des lampes LED (Light-emitting diode) qui émettent dans le bleu (Levin *et al.*, 2020). En 2019, la NASA propose une série de produits Black Marble qui présentent une résolution spatiale de 500 m. Les images sont composées des radiances nocturnes journalières corrigées des effets de la couverture nuageuse, de l'atmosphère, du relief, de la lumière lunaire et de la lumière parasite (Levin *et al.*, 2020 ; Ji *et al.*, 2024). L'avènement des satellites commerciaux depuis les années 2000 a permis d'affiner encore plus la résolution spatiale des

images nocturnes. EROS-B est le premier satellite commercial à offrir des images à une résolution spatiale inférieure à 1 mètre grâce à un capteur panchromatique. Ensuite, en 2017 et 2018, les satellites Jilin1-03 et LuoJia-1 sont lancés avec une résolution spatiale de respectivement 1 mètre et 130 m. Les satellites de la série Jilin1 appartiennent à la compagnie chinoise Changguang Satellite Technology. Contrairement à EROS-B, les images nocturnes sont multispectrales (Levin *et al.*, 2020), ce qui permet de calculer des indices avec les bandes rouge, verte et bleue (RGB) comme l'indice de suppression de la mélatonine ou le potentiel d'une source lumineuse à induire la photosynthèse à travers l'indice de photosynthèse induite (Sánchez de Miguel *et al.*, 2019).

Néanmoins, il reste de nombreux défis spécifiques à l'observation de la pollution nocturne par satellite. Tout d'abord, les sites capturés combinent des sources naturelles avec des valeurs très faibles et des sources artificielles variant en intensité, en orientation et au niveau de leur signature spectrale. Dès lors, les capteurs doivent trouver un compromis entre une résolution spectrale suffisamment large et une résolution spatiale la plus fine possible. Le défi est encore plus grand maintenant avec la transition globale vers les LED. En effet, le spectre des lampes LED est plus large que celui des lampes à sodium, par exemple, et comme dit ci-dessus, la composante bleue n'est pas captée par certains satellites nocturnes. Selon Bará *et al.* (2019), le capteur VIIRS peut même observer une réduction des émissions dans la bande DNB alors que les observations au sol constatent une évolution inverse. Une comparaison entre des images Jilin1 et des mesures par drone confirment cette tendance (Guk & Levin, 2020). La corrélation entre la bande bleue des deux capteurs est la plus faible en comparaison avec la corrélation entre les bandes rouges. De plus, l'angle de vue influence fortement les observations en raison de l'ombrage des bâtiments ou de la végétation ou encore des lumières provenant de façades ou de fenêtres. Enfin, la variabilité temporelle des données ne doit pas être oubliée. Les satellites Suomi-NPP et DMSP sont polaires et ont donc un horaire fixe, empêchant d'observer les dynamiques de l'éclairage nocturne au cours de la nuit. Cette variabilité s'explique en partie par les choix politiques qui diminuent voire éteignent partiellement le parc d'éclairage. À l'échelle saisonnière, la présence de neige influence la luminance captée (Levin *et al.*, 2020). En été dans les hautes latitudes, la fenêtre d'observation peut être très limitée (Ji *et al.*, 2024).

Les données satellitaires permettent d'obtenir le flux de lumière ascendant, c'est-à-dire le flux traversant l'atmosphère pour être capté par le satellite (Cinzano & Falchi, 2013). Après des corrections atmosphériques propres à chaque satellite, Zheng *et al.* (2018) et Xue *et al.* (2020) utilisent cette valeur pour retrouver un autre indicateur bidimensionnel : la luminosité du ciel

nocturne artificiel. Cet indice correspond à la quantité de lumière diffusée et perçue dans la direction de vue de l'observateur (Cinzano & Falchi, 2013). L'unité est le $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ pour une radiance d'énergie, reprenant ainsi une unité pour le flux énergétique, une unité pour la surface observée et une dernière pour mesurer l'angle solide. Néanmoins, ces données satellitaires ont besoin d'être confirmées par des mesures au sol. En effet, les sources de lumières captées par le satellite présentent une variabilité temporelle et directionnelle, ce qui complexifie les comparaisons mêmes entre deux images espacées de quelques heures (Levin *et al.*, 2020). De plus, les images satellitaires captent la lumière émise verticalement mais sous-estiment la composante horizontale de la lumière, qui est une source importante de pollution.

3.2.2. Les données prises au sol

Pour réaliser les mesures au sol, trois méthodes principales sont recensées : le Sky Quality Meter (SQM), les photographies hémisphériques avec un objectif fish-eye et les spectromètres, plus complexes à utiliser et plus coûteux. Des modèles de transfert radiatif utilisent également ces données afin de prédire la distribution de la pollution lumineuse à différentes échelles (Levin *et al.*, 2020). Par exemple, Morrell *et al.*, (2024) ont modélisé la distribution spatiale et spectrale de la lumière en connaissant la nature des points lumineux d'une rue d'Exeter au Royaume-Uni. Laforge *et al.* (2019) ont réalisé une modélisation de corridors urbains pour les chauves-souris dans l'aire métropolitaine de Lille. Un échantillonnage aléatoire basé sur trois variables, le taux de surfaces imperméables, la couverture arborée et la présence de lumière artificielle, a été réalisé afin d'enregistrer l'activité des chauves-souris. C'est sur base de l'imagerie nocturne VIIRS que la radiance du site a été obtenue. Grâce à ces données, la présence et l'activité des espèces ont été modélisées afin de créer une carte de résistance du paysage qui a permis à son tour d'analyser la connectivité entre des zones cœurs à l'aide de corridors sombres. Les résultats mettent en évidence l'importance des zones humides et de la pollution lumineuse qui ont un effet conséquent pour la présence et l'activité des espèces, à l'inverse des surfaces imperméables. La proximité de ces zones avec la végétation influence quant à elle l'activité uniquement. Ji *et al.* (2024) observent un fort accroissement de la luminosité au sein et en périphérie des réserves naturelles nationales chinoises en comparant des images composites mensuelles du satellite NPP/VIIRS entre 2013 et 2022. Bien que l'évolution soit moindre à l'intérieur des réserves naturelles, la forte pollution des zones environnantes fait de ces réserves des îles sombres isolées.

Cela nous ramène bien à la problématique initiale du manque de connectivité des zones protégées mais cette fois-ci lors de la nuit particulièrement. De plus, des espèces photophiles peuvent également être attirées par les périphéries, agissant comme des pièges.

L'émergence de l'imagerie drone amène de nouvelles opportunités en termes de suivi à une échelle plus locale. La résolution spatiale obtenue est très fine, permettant une identification précise des zones sur-illuminées ou des sources de pollution lumineuse mal orientées par exemple (Bobkowska *et al.*, 2024). De plus, l'usage de drones permet une récolte de données plus flexible par rapport à l'acquisition d'images satellitaires commerciales. Cela permet un suivi et un diagnostic plus complets à l'échelle d'un quartier ou d'un parc. Néanmoins, le drone doit être adapté afin de pouvoir faire face à plusieurs défis (Bobkowska *et al.*, 2024). Tout d'abord, les capteurs utilisés comme les caméras multispectrales, les spectromètres ou les SQM ne sont pas toujours adaptés et conçus pour être installés sur un drone. De ce fait, la calibration est un enjeu majeur afin d'assurer la fiabilité des données. La calibration doit être réalisée en amont avec des sources lumineuses connues afin de rendre efficacement la répartition de la lumière sur le terrain. Ensuite, le drone doit être maintenu en vol stationnaire lors de la prise de vue afin d'améliorer la qualité des données. Cela requiert une gestion de la stabilité de l'appareil, tout en rendant les vols en drones très dépendants des conditions météorologiques. La batterie et la charge utiles sont également des facteurs essentiels, demandant un compromis entre le nombre de capteurs et la durée de vol. Le cadre juridique représente aussi une contrainte majeure. Enfin, les données récoltées doivent être traitées et synchronisées après obtention, ce qui demande une méthodologie plus complexe que les images satellites (Bobkowska *et al.*, 2024). En conclusion, bien que l'imagerie par drone offre un potentiel considérable pour l'analyse de la pollution lumineuse à une échelle micro, les défis techniques, opérationnels et juridiques limitent l'accès et l'utilisation de ces données actuellement.

4. Etat des lieux en Belgique

4.1. Les projets de trame noire

Actuellement, les trames noires sont peu développées en Belgique. En fin d'année 2023, le SPW a lancé un appel à projet afin d'accompagner dix communes intéressées par le développement d'une trame noire et la lutte contre la pollution lumineuse. La réflexion autour des plans d'action s'étale sur un an, de début 2024 à début 2025. Le projet « Trame noire en Wallonie » a retenu les communes de Ellezelles, Dour, Mons, Court-Saint-Etienne, Philippeville, Yvoir, Enghien, Saint-Ghislain, Rochefort et Andenne (Biodiversité en Wallonie, s.d.). Actuellement, aucune de ces communes n'a encore partagé des avancées du projet.

D'autres organismes s'intéressent au sujet en Wallonie. En guise d'exemple, nous pouvons citer le Parc naturel des Sources et le Parc naturel Burdinale-Mehaigne. Ce dernier a bénéficié entre 2020 et 2021 du travail de Charlotte Angerand (2021) qui dans le cadre de son travail de fin d'étude a quantifié la pollution lumineuse sur le Parc naturel. La finalité de ce travail est un support cartographique repérant les zones éclairées qui sont en conflit avec les besoins de la faune. Un scénario futuriste réaliste a également été proposé afin d'évaluer l'emprise de l'éclairage en fonction des aménagements réalisés. Afin de réaliser cette cartographie, les informations sur les points lumineux présents ont été croisées avec les données décrivant la biodiversité à travers les habitats et les espèces. L'emprise de la lumière artificielle nocturne a été estimée grâce à des mesures sur le terrain, des données du réseau public et d'une orthophoto nocturne.

Les avancées sur la trame noire au sein du Parc naturel des Sources sont également liées en partie avec un travail étudiant. En effet, j'ai réalisé un stage durant cette année académique sur le sujet de la trame noire et de la pollution lumineuse pour le Parc. La méthodologie diverge de celle mise en place dans le Parc naturel Burdinale-Mehaigne. Des images drones ont été prises sur les villes et villages principaux des communes de Spa et Stoumont, qui composent le territoire du Parc naturel des Sources. Ces données ont été croisées avec des images satellites et des données d'occupation du sol. Le stage s'est fini avant la création d'une trame noire mais a permis de mettre en place une méthodologie claire afin d'identifier les zones éclairées et sombres des images drones et satellitaires. La méthode se base sur la classification des pixels de l'image à partir d'une régression logistique sur base d'une classification manuelle de portions de l'image.

La régression logistique permet de calculer la probabilité de chaque pixel d'être considéré comme éclairé ou non. Le modèle s'entraîne sur les points classés manuellement afin d'identifier la relation permettant de minimiser l'écart entre les prédictions et les réponses au sein des échantillons. Cette méthode a permis d'identifier les zones lumineuses et de les relier à l'occupation du sol ainsi que d'observer l'emprise de chaque bande (rouge, verte, bleue) séparément. Par la suite, des corridors sombres théoriques auraient été identifiés à l'aide de l'emprise lumineuse identifiée et du coût de déplacement des espèces de chauves-souris sélectionnées.

4.2. Projet intégré en Wallonie

À l'échelle de la Grande Région qui regroupe des territoires de l'Allemagne, de la France, de la Belgique ainsi que du Grand-Duché du Luxembourg, un programme Interreg visant à répondre aux problématiques de la pollution lumineuse a été mis en place. Le projet Smart Light-Hub s'est développé afin de répondre aux enjeux liés à l'éclairage artificiel d'un point de vue économique et écologique. Les objectifs sont de lutter contre la pollution lumineuse ainsi que préserver la biodiversité. Le projet s'est déroulé de 2019 à fin 2022 en réunissant quatre acteurs principaux : l'Université de Liège, l'Université de Trèves, Natagora et le Territoire Naturel Transfrontalier (TNT) (Smart Light-Hub, s.d. a). Ce projet a permis de créer un réseau transfrontalier spécialisé dans la pollution lumineuse ainsi que l'organisation d'évènements publics et d'échanges, rendant le projet pérenne sur ces aspects. Des prototypes d'éclairage intelligents conçus dans le cadre du projet ont également été installés dans quatre communes (Smart Light-Hub, s.d. b).

5. Contexte du site d'étude

Le site d'étude est situé au Sart-Tilman à une altitude d'environ 240 mètres au niveau du campus et de 70 mètres dans la plaine alluviale de l'Ourthe. Le plateau du Sart-Tilman représente la limite orientale de l'Ardenne condrusienne dont les roches (composées de formations calcaires, schisteuses et gréseuses) ont été plissées lors du plissement hercynien. Le Sart-Tilman est principalement un domaine boisé partagé entre les forêts feuillues sur le plateau et les versants et la vallée de l'Ourthe en contrebas. Le contexte paysager de cette dernière est dans la continuité des versants avec des forêts feuillues mais présente également des particularités en lien avec l'écoulement de l'Ourthe ainsi que des pelouses sèches, calaminaires et calcaires. La géologie du substrat favorise la présence de cavités souterraines (Lebeau *et al.*, 2016).

Le Sart-Tilman s'est développé de part et d'autre du massif boisé qui compose la réserve naturelle du Sart-Tilman, occupant les versants de la vallée du Blanc Gravier. Le versant gauche (dans le sens d'écoulement du Blanc Gravier) rassemble la majorité des bâtiments d'enseignements, regroupés dans les quartiers Agora, Village, Polytech et Urbanistes (Université de Liège, 2023). Le Science Park ainsi que les surfaces habitées sont également développés sur ce versant. De l'autre côté, sur le versant droit, les infrastructures demandant plus d'espace sont implantées. C'est le cas du quartier Hôpital avec le CHU (Centre Hospitalier Universitaire), le quartier Blanc Gravier qui regroupe les équipements sportifs et le quartier Vallée composé des bâtiments vétérinaires et du château de Colonster (Université de Liège, 2023). Le développement du Sart-Tilman est visible sur la figure 4, où les deux versants sont limités par la réserve naturelle agréée. De plus, le site est excentré du centre-ville de Liège et est accessible uniquement en voiture et par quelques lignes de bus. Dès lors, le réseau routier structure les déplacements sur le campus avec la présence de nombreux parkings. Néanmoins, la mobilité douce se développe sur le plateau. En effet, l'Université de Liège souhaite prolonger et rénover les pistes cyclables autour des homes étudiants et du CHU notamment. Ces nouvelles pistes cyclables seront accompagnées d'un éclairage intelligent (Janssens, 2024). Une cyclostrade reliant le RAVeL de l'Ourthe et le versant droit du campus est en cours de projet ainsi qu'une cyclostrade reliant Sclessin au campus. À la suite du chantier sur la route du Condroy dans la côte du Sart-Tilman, un réaménagement des voies permettra d'implanter des pistes cyclables (myULiège, 2024a). De plus, le campus possède un réseau dense de sentiers et chemins qui permettent de se déplacer sur le campus et de relier les deux versants en vingt minutes (myULiège, 2024b).

À l'échelle de la Ville de Liège, le Sart-Tilman est considéré comme un nœud essentiel dans son réseau écologique. L'actualisation du PCDN (Plan communal de développement de la nature) de 1998 réalisé par l'Unité Biodiversité et Paysage (Lebeau *et al.*, 2016) rappelle cette importance. Le site est notamment reconnu pour ses importantes surfaces boisées en bon état qui contiennent des zones centrales principales du réseau écologique boisé liégeois. Différents peuplements forestiers s'y développent dont des chênaies, des hêtraies et des peuplements plus mixtes (Lebeau *et al.*, 2016). Cette diversité permet également d'accueillir de nombreuses espèces animales sur près de 370 ha reconnus dans le réseau écologique boisé, ce qui correspond à 35 % de la surface du réseau (Lebeau *et al.*, 2016 ; Gillet *et al.*, 2024). De plus, d'autres habitats d'intérêt sont présents sur le site : des milieux ouverts qui comprennent notamment des prairies humides et des pelouses sèches et des landes comme celle de Streupas, des cavités souterraines ainsi que des milieux liés au réseau hydrique présent. Les milieux à caractère anthropique et réseau urbain complètent le paysage et sont également intégrés dans la réflexion du réseau écologique (Lebeau *et al.*, 2016).

Pour aller plus loin, l'Université de Liège s'est dotée récemment de son propre réseau écologique afin d'assurer la connectivité des habitats naturels sur le campus ainsi qu'en dehors. En effet, l'Université de Liège se réfère au Schéma d'Aménagement du Sart-Tilman comme outil de planification spatiale afin d'évaluer le potentiel urbanisable et les développements futurs du site (Gillet *et al.*, 2024). Néanmoins, la prise en compte des enjeux de biodiversité est relativement faible, ce qui a motivé l'Université à intégrer ces enjeux au travers d'un réseau écologique propre au site. Le réseau écologique du Sart-Tilman a été réalisé par les membres de la cellule Biodiversité et paysage de Gembloux (Gillet *et al.*, 2024).

De plus, la zone d'étude présente de nombreux sites d'intérêt pour la biodiversité au sein du périmètre ou à proximité directe (Gillet *et al.*, 2024). Certains de ces sites peuvent être distingués par rapport à leur statut de protection.

Cinq sites possèdent un statut de protection :

- La réserve naturelle agréée (RNA) du Sart-Tilman possède le statut de protection le plus fort. En effet, toutes les interventions sont interdites, hormis celles de gestion du site. La gestion est d'ailleurs opérée par une personne physique ou morale autre que la Région wallonne elle-même. Dans ce cas-ci, le gestionnaire est la Commission Scientifique de l'Université de Liège (Gillet *et al.*, 2024). La majeure partie de la réserve est en réserve naturelle, ce qui signifie que le milieu peut évoluer de lui-même.

- La réserve naturelle agréée de l'Île aux Corsaires au nord du site d'étude.
- Le site Natura 2000 du Bois de Neuville et de la Vecquée (BE33013) de 381 ha. Comme décrit plus tôt, le statut de protection d'un site Natura 2000 est moins restrictif que celui d'une réserve naturelle, autorisant les activités humaines tout en assurant une compatibilité avec la sauvegarde des espèces et des habitats présents.
- Le site Natura 2000 de la Vallée de l'Ourthe entre Comblain-au-Pont et Angleur (BE33014) de 704 hectares.
- Le site Natura 2000 de la basse vallée de la Vesdre (BE33016) de 338 ha.

De plus, six autres sites ne possédant pas de statut de protection sont recensés. Tous ces sites sont des sites de grand intérêt biologique (SGIB) :

- Le domaine du Sart-Tilman (SGIB 248) de 413 ha.
- Le terroir du bois Saint Jean (SGIB 2771) de 71 ha.
- La vallée de l'Ourthe en aval de Tilff (SGIB 3584) de 114 ha.
- Le bois de la Neuville et de la Vecquée (SGIB 2113) de 1528 ha.
- Le thier des Critchons (SGIB 2334) de 20 ha.
- La Roche aux Faucons (SGIB 3248) de 80 ha.

L'emprise des différents SGIB provient d'une image partagée par un agent du SPW (E. Peiffer, comm. pers., 2025) car le site Biodiversité du SPW n'est plus accessible au moment de réaliser ce mémoire. Une fois cette image obtenue, les surfaces ont été vectorisées sur Arcgis après avoir géoréférencé l'image. Un même site peut cumuler différents statuts comme le démontre la figure 4 où la RNA du Sart-Tilman est également englobée dans un SGIB.

Les limites choisies correspondent à celles du secteur statistique du Sart-Tilman défini par le SPW (WalStat, 2025). Ces limites, bien qu'arbitraires, cadrent suffisamment le site d'étude. De plus, un tampon de 1 km est réalisé afin de couvrir une zone plus large que les limites finies du site. L'objectif de ce buffer est d'estimer la connectivité du site dans le reste du paysage afin d'assurer des liaisons cohérentes. De plus, le buffer permet d'intégrer le Science Park à l'étude. Les limites sont présentées sur la figure 3 ci-dessous. Au nord, le buffer est découpé pour correspondre avec la limite des données spatiales que nous possédons dans le cadre de ce mémoire.

Périmètre d'étude du Sart-Tilman et sites d'intérêt pour la biodiversité proches du Sart-Tilman, 2025

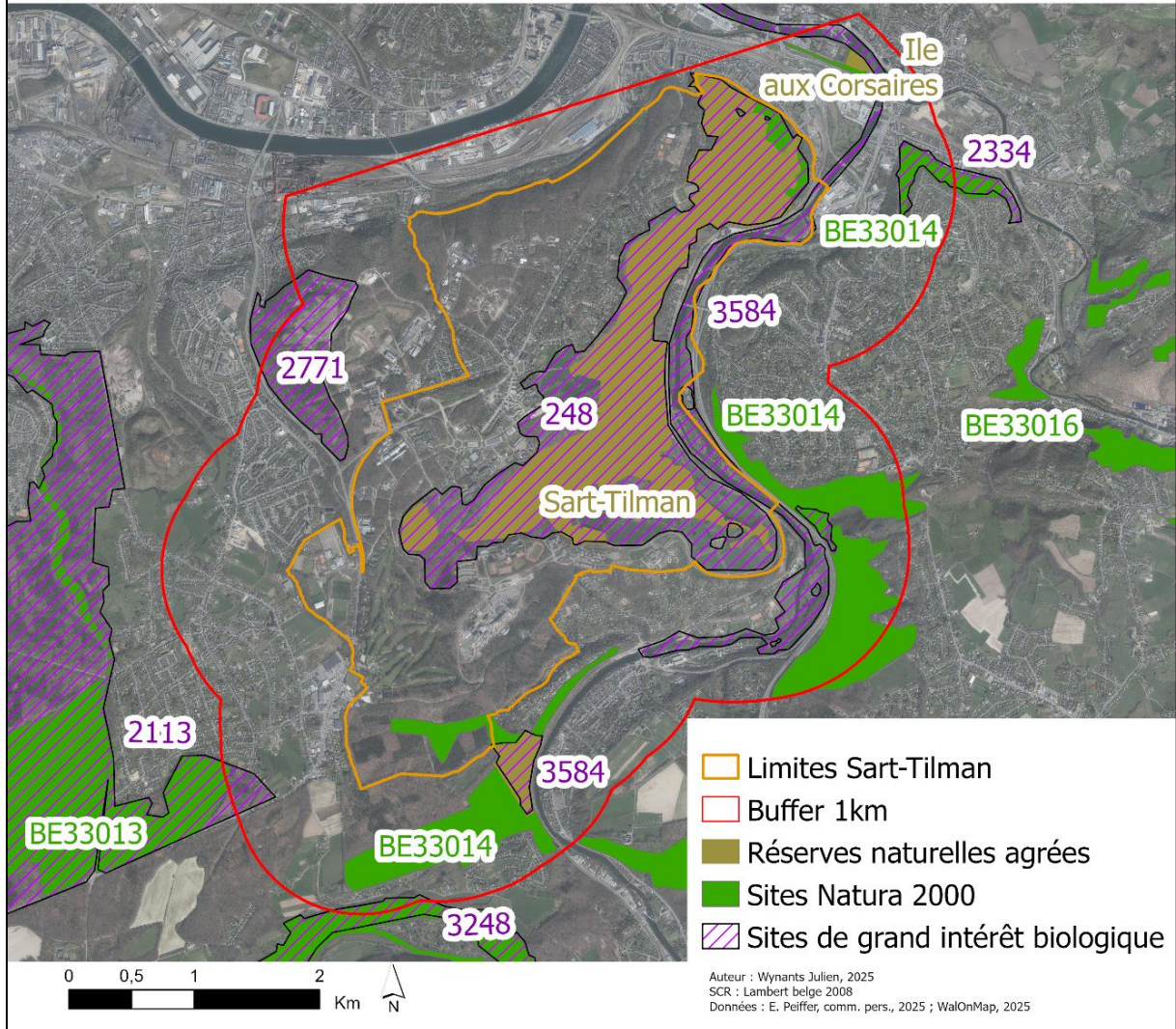


Figure 4 : Représentation du périmètre d'étude situé sur le site du Sart-Tilman ainsi que des différents périmètres des sites d'intérêt pour la biodiversité. Le périmètre se répartit en deux surfaces, celle de la commune du Sart-Tilman et un tampon (buffer) de 1 km autour du site. Auteur : WYNANTS Julien, 2025

6. Matériel et méthodes

L'objectif majeur de ce travail est de mettre en place une méthodologie correcte et de l'appliquer. De ce fait, cette section est centrale.

La mise en place d'une méthodologie claire est nécessaire pour intégrer la pollution lumineuse dans une démarche de réseau écologique. Les différentes phases du travail sont inspirées en partie d'articles traitant du sujet comme celui de Sordello (2017) et de Sordello *et al.* (2021). Les données à disposition sont présentées dans un premier temps, ainsi que les différents traitements nécessaires pour les utiliser. Ensuite, les enjeux liés à la pollution lumineuse sur le territoire sont identifiés. Le travail étant orienté vers les enjeux de biodiversité principalement, l'investigation s'appuiera sur le réseau écologique déjà existant. Une fois, cette évaluation réalisée, les zones de conflits entre l'éclairage nocturne et le réseau écologique seront identifiées puis les différents enjeux humains et de biodiversités seront départagés en fonction des forces en présence. Les traitements ont été réalisés grâce au logiciel ArcGis Pro 3.5.0.

6.1. Les hypothèses

L'objet de recherche de ce mémoire est d'établir si la mise en place d'une trame noire sur le Sart-Tilman est pertinente ainsi que de mettre en place une méthode afin de l'implanter.

Dès lors, plusieurs hypothèses émergent vis-à-vis de ce questionnement :

- Le site n'est pas suffisamment impacté par la pollution lumineuse pour que la mise en place d'une trame noire soit pertinente.
- La pollution lumineuse observée est localisée et impacte les corridors écologiques du réseau écologique existant sur le territoire étudié.
- La pollution lumineuse observée n'impacte pas le réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman et ne nécessite pas d'aménagements.

6.2. Les sources de données et traitements

Un des défis principaux de ce travail fut d'obtenir des données permettant d'observer la pollution lumineuse sur l'ensemble du site du Sart-Tilman avec une résolution spatiale suffisamment fine. En effet, commander des images satellites représente un budget bien trop conséquent dans le cadre d'un mémoire. De plus, obtenir les images prend quelques mois et dépend en grande partie des conditions météorologiques (C. Massart, comm. pers., 2025).

Ce segment développe l'obtention des données satellites exploitées et comment elles sont traitées. Les autres sources utilisées, ou envisagées, seront également développées ci-dessous ainsi que les divers traitements appliqués.

6.2.1. Les images satellites

Le travail porte sur l'analyse d'images satellitaires de nuit. Les produits Black Marble de la Nasa n'ont pas été utilisés car la résolution spatiale de 500 m n'est pas suffisante pour le travail, comme le montre la figure 5. Sur cette carte, l'image provient du satellite VIIRS/NPP et est issue du produit VNP46A1. Le constat est clair, cette résolution spatiale ne permet pas de décrire la pollution lumineuse nocturne sur le Sart-Tilman à une échelle spatiale suffisamment fine pour construire une trame noire. De plus, le capteur étant panchromatique, les données ne permettent pas de distinguer les différents types d'éclairage. Néanmoins, des constats généraux peuvent être mis en évidence. Tout d'abord, le nord de la carte, qui correspond aux abords du site SNCB de Kinkempois et à Angleur, est plus éclairé que le sud qui est moins urbanisé. Ensuite, une zone faiblement éclairée est visible au sein des limites du Sart-Tilman. Cette zone correspond grossièrement aux limites de la RNA du Sart-Tilman.

À la suite de ces premières observations, une autre source de données à une résolution spatiale plus fine a été recherchée. Une discussion avec Thierry Kervyn (comm. pers., 2025) a permis d'obtenir des images satellitaires couvrant l'ensemble du site d'étude. Ces données représentent la base principale d'étude de la pollution lumineuse sur le site. Les images obtenues ont été commandées par Belspo lors d'une mission réalisée en 2020 sur le bassin de l'Ourthe. Cette série d'images provient du satellite commercial chinois Jilin1-7B (JL107B) dont le capteur est multispectral, permettant d'obtenir des images avec trois bandes (rouge, vert, bleu). Le satellite a survolé le Sart-Tilman le 25 mars 2020 à 22h02 et l'image originale est présentée dans la

figure 6. Elles ont toutes un niveau de traitement « L1A », ce qui signifie que l'image n'est pas orthorectifiée mais présente les corrections radiométriques de base. Chaque image est également accompagnée de métadonnées permettant de réaliser la correction géométrique. La résolution spatiale est de 1,5 m. Plusieurs images ont été obtenues mais une seule a été travaillée car elle recouvrait l'ensemble du site. Les autres images se chevauchent en partie avec l'image sélectionnée mais sans intersections directes avec le site d'étude. Dès lors, aucune autre image n'a été exploitée. La réponse spectrale du capteur multispectral est présentée dans la figure 7. Cette signature correspond à celle du satellite Jilin1-3B qui est un satellite similaire au Jilin1-7B.

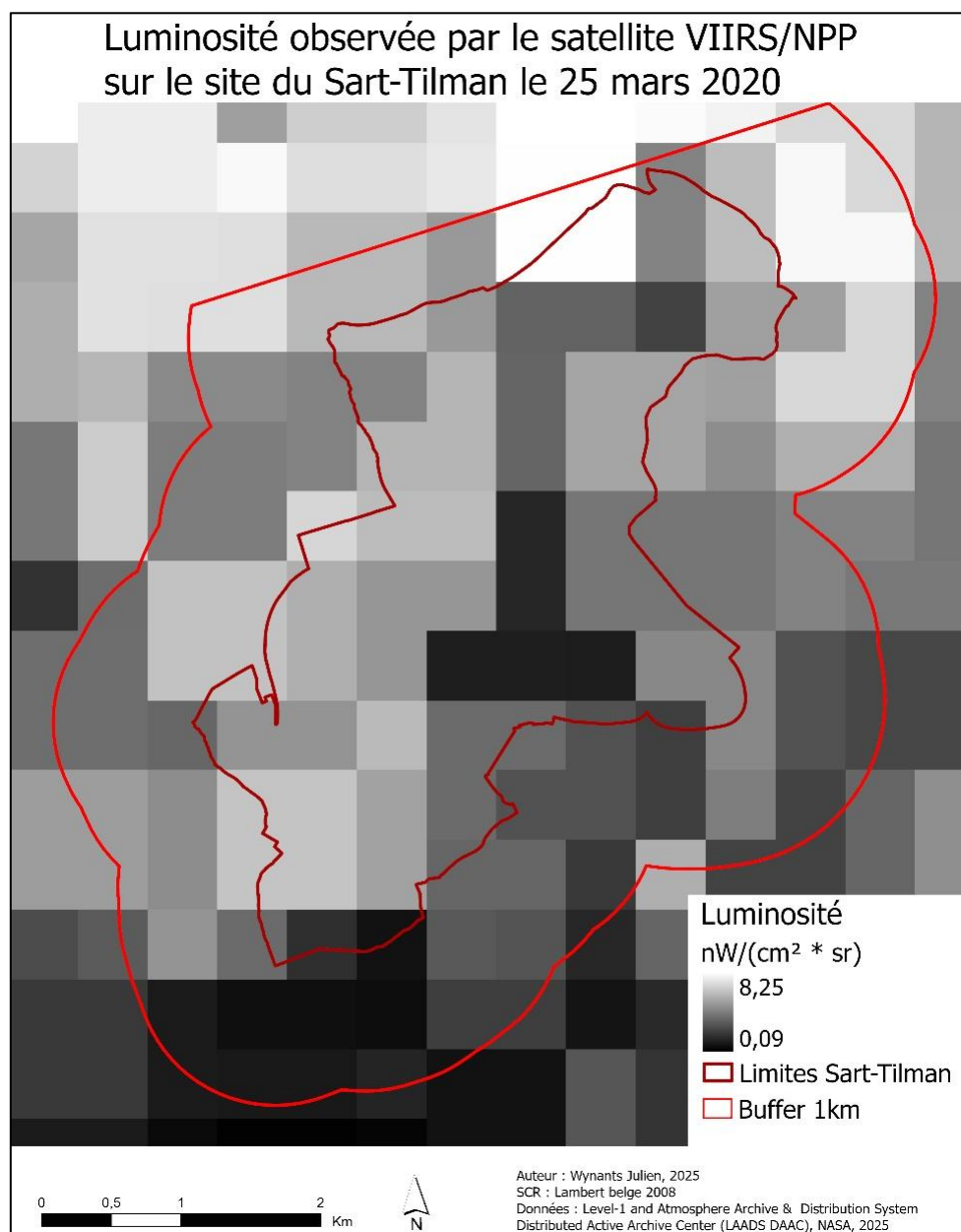


Figure 5 : Luminosité du Sart-Tilman mesurée par la bande DNB du satellite VIIRS/NPP de la NASA durant la nuit du 25 mars 2020. Auteur : WYNANTS Julien, 2025

Image satellite nocturne du Sart-Tilman et des environs, le 25 mars 2020 à 22h02

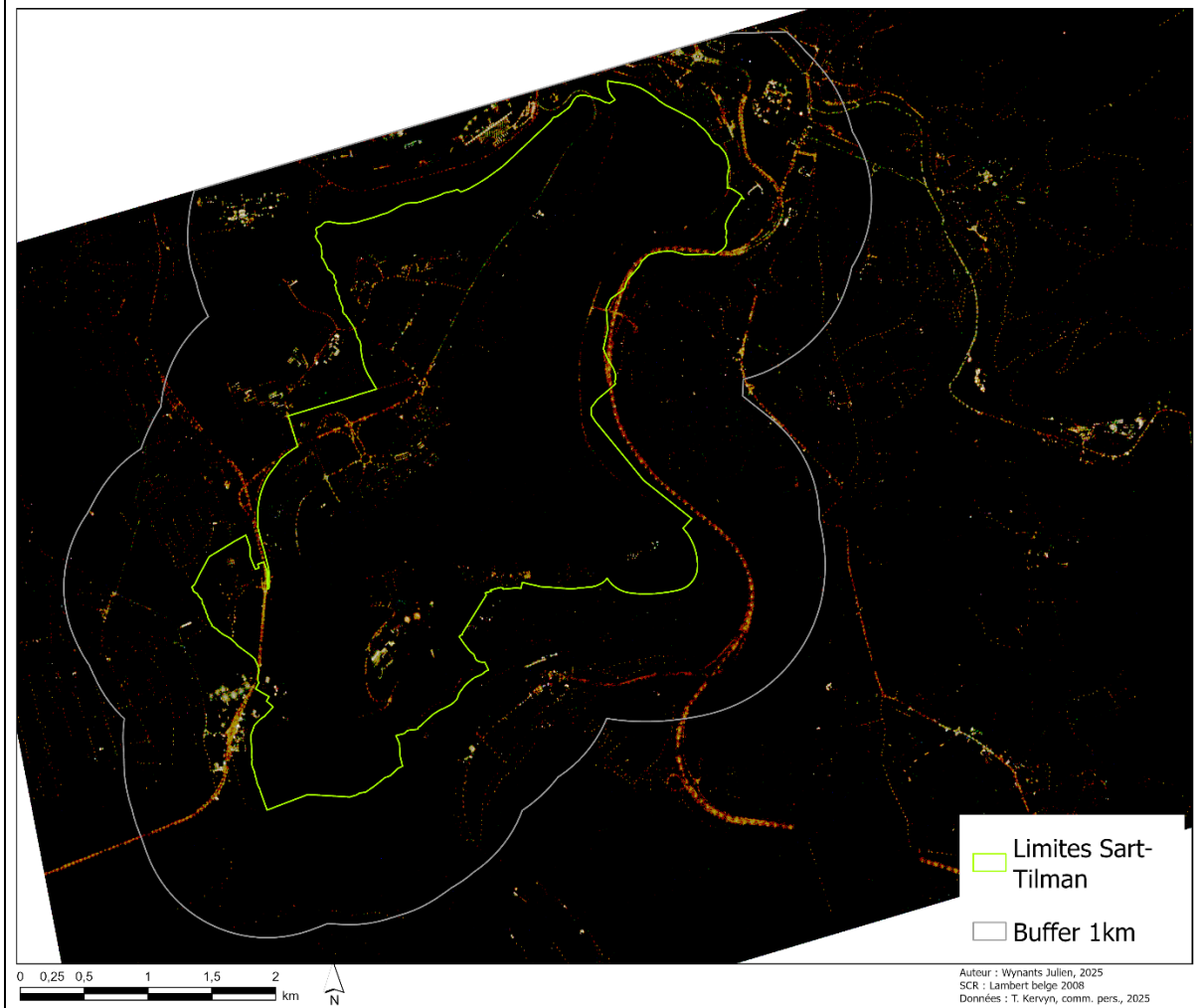


Figure 6 : Image satellite nocturne du Sart-Tilman prise le 25 mars 2020 à 22h02 par le satellite Jilin1-7b. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

L'image sélectionnée présente un SNR (signal to noise ratio) de 73 pour la bande rouge et de 25 pour les bandes verte et bleue. Cela indique que les bandes verte et bleue ont une faible séparation entre le signal utile et le bruit sur l'image, ce qui s'explique en partie par le fait que l'éclairage nocturne est relativement faible et de ce fait, la quantité d'informations captée par le satellite est limitée. De plus, les longueurs d'ondes courtes comme le bleu sont plus diffusées dans l'atmosphère, réduisant encore la quantité de lumière captée. JL1-7B est aussi moins sensible au bleu qu'au rouge, ce qui explique ces différences de SNR. Nous pouvons également nous demander si les lumières sur le site émettent en majorité dans le rouge comme les lampes sodium haute pression, les halogènes ou certains LED. En observant la figure 7, la bande rouge est plus large que les deux autres. La bande verte est plus étroite, ce qui explique en partie la

moindre sensibilité. Pour ce qui est de la bande bleue, la bande est elle-même légèrement plus étroite que la bande verte.

L'image est en 16 bits, ce qui signifie que les valeurs d'une bande sont comprises entre 0 et 65 535. Un pixel ayant une valeur de 0 dans les trois bandes est un pixel totalement noir où aucun signal n'a été enregistré. À l'inverse, un pixel ayant une valeur de 65 535 dans les trois bandes correspond à un pixel blanc pur.

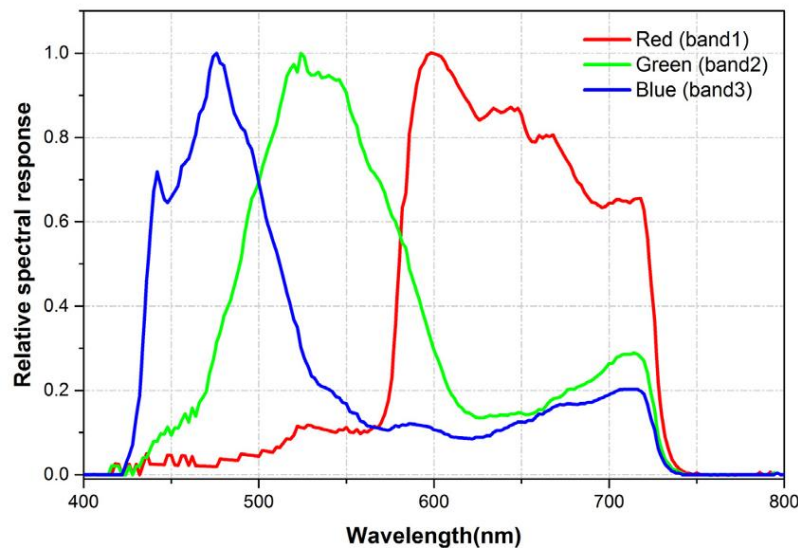


Figure 7 : Réponse spectrale relative du satellite Jilin1-3B. Issu de Zheng *et al.* (2018).

Pré-traitement

Le traitement est inspiré en partie des articles de Zheng *et al.* (2018) et Xue *et al.* (2020) car ils ont travaillé avec des images Jilin1-3B. Zheng *et al.* (2018) ont exploré les possibilités offertes par la résolution spatiale fine proposée par ce satellite. Xue *et al.* (2020) ont cartographié la pollution lumineuse d'une ville afin d'identifier les zones d'habitats pour des oiseaux. Le traitement est également inspiré des expériences vécues durant un stage au Parc naturel des Sources.

L'image brute a été projetée en Lambert belge 2008. Afin de conserver les valeurs originales de réflectance, la méthode de rééchantillonnage sélectionnée est celle du plus proche voisin. Ensuite, le géoréférencement initial a été ajusté car il n'était pas optimal. Cette étape est essentielle car elle permet de superposer la lumière émise aux sources lumineuses. Néanmoins, les images de nuit peuvent être plus complexes à géoréférencer car une grande partie des images

sont noires. De ce fait, les points optimaux comme les bases de bâtiments ne sont pas visibles. Dès lors, le réseau routier représente la source de GCP (ground control points) la plus fiable dans le contexte nocturne. Une orthorectification a été réalisée avec les RPC (rational polynomials coefficients) présents dans les fichiers accompagnant l'image. Ensuite, un géoréférencement manuel a été également effectué afin d'affiner la position de l'image dans l'espace. L'image a ensuite été découpée sur base d'un tampon de 1 km des limites administratives du quartier du Sart-Tilman afin d'alléger les traitements.

Une fois le géoréférencement réalisé, un filtre médian a été appliqué sur un carré de 3x3 pixels autour de chaque pixel. L'objectif est d'éliminer les valeurs aberrantes, c'est-à-dire, des pixels anormalement lumineux ou sombres isolés. Une fenêtre de 3x3 représente un léger lissage qui préserve les contours et la valeur médiane est choisie car elle est moins affectée par les valeurs extrêmes que la moyenne. À l'aide des coefficients de gain et d'offset inclus dans les métadonnées, l'image a subi une calibration radiométrique. Ce traitement permet de passer des Digital Numbers (DN), allant de 0 à 65 535, à une valeur de radiance spectrale en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$. Néanmoins, ce traitement combine les trois bandes, empêchant une visualisation en RGB de l'image post-traitement. La relation mathématique utilisée est la suivante :

$$L_{\lambda} = \text{Gain} \times \text{DN} + \text{Offset}$$

où L_{λ} représente la radiance spectrale. Les valeurs de gain et d'offset sont données pour les trois longueurs d'ondes dans le tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs des coefficients de gain et d'offset pour les bandes rouge, verte et bleue de l'image satellite Jilin1-7b.

	Rouge	Vert	Bleu
Gain	0,000574	0,000644	0,000895
Offset	0,009202	0,009854	0,011851

Ensuite, les valeurs de radiance ont été regroupées en une bande unique en passant par une échelle de gris à l'aide de la méthode développée par Grundland & Dodgson (2007) et appliquée dans les articles de Zheng *et al.* (2018) et Xue *et al.* (2020). Cette technique conserve une correspondance entre les niveaux de gris et les valeurs de radiance tout en offrant une compréhension visuelle rapide en conservant les contrastes.

Ainsi, les pixels affichant la même couleur dans l'image d'origine afficheront la même teinte de gris. L'équation de la méthode de Grundland & Dodgson (2007) est celle-ci :

$$\text{Luminance} = 0,2989 \times \text{Rouge} + 0,587 \times \text{Vert} + 0,114 \times \text{Bleu}$$

où la luminance représente la valeur de gris obtenue et le rouge, le vert et le bleu symbolisent les valeurs de radiance spectrale. L'unité est identique à celle de la radiance spectrale, c'est-à-dire en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

De plus, afin de comparer les valeurs obtenues avec celles des articles de référence, nous avons convertis les données en $\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. Pour ce faire, après la calibration radiométrique, nous intégrons la largeur spectrale en multipliant la radiance de chaque bande par la largeur spectrale. La largeur spectrale de chaque bande est estimée à l'aide de la figure 7. Les valeurs approximatives sont : 0,14 μm pour la bande rouge, 0,09 pour la bande verte et 0,08 μm pour la bleue. Ensuite, la conversion pour passer de $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ à $1 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ se résout en multipliant le résultat par 100 000. Une fois les calculs réalisés, la luminance est à nouveau calculée. La valeur minimale trouvée est de 84,3 $\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, ce qui est relativement proche de la valeur minimale trouvée dans les articles de Zheng et al. (2018) et Xue et al. (2020) de 89 $\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. La légère différence est certainement expliquée par l'estimation des largeurs spectrales ou par le fait que le territoire étudié est globalement moins éclairé.

Néanmoins, après les traitements, l'image conserve certains pixels avec des valeurs aberrantes et de ce fait, un nouveau traitement pour retirer ces valeurs a été réalisé. Les valeurs au-delà de 5 000 $\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ sont considérées comme anormalement élevées en se basant sur les valeurs maximales présentées dans les articles de Zheng et al. (2018) et Xue et al. (2020). Leurs études portant sur des quartiers urbains, nous avons considéré que les valeurs entre 5 000 et 9 500 $\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ étaient trop élevées. Ces valeurs ont été localisées afin d'évaluer l'origine de l'erreur. Les pixels se situent à Bonnelles au niveau de magasins et sur un bâtiment du Royal Golf Club du Sart-Tilman. Bien que leurs localisations soient cohérentes, ces valeurs peuvent être associées à des sources lumineuses trop intenses pour le capteur ou à une erreur durant le traitement de l'image. Les valeurs jugées aberrantes ont été modifiées en réalisant un rééchantillonnage. Pour chaque pixel, la médiane des valeurs des pixels voisins dans un carré de 5x5 a été calculée. Cette méthode est privilégiée car la médiane permet de réduire l'impact des valeurs aberrantes voisines et la taille du voisinage de 5x5 pour sortir des clusters les plus larges, tout en restant sur des valeurs de luminosité élevées. La chaîne de traitement des étapes effectuées dans ArcGis est disponible dans l'annexe 1.

6.2.2. Les images drones

L'imagerie drone a également été envisagée pour compléter les données satellitaires sur des secteurs précis du site d'étude comme le campus du Sart-Tilman. Après avoir analysé les images satellites, cette option n'a pas été retenue. De plus, des contraintes temporelles ont également empêché la mise en place de la démarche.

Néanmoins, l'imagerie drone est une option intéressante et qui pourrait compléter les recherches dans un futur travail afin d'affiner les analyses. En effet, en regardant l'exemple du Parc Naturel des Sources, l'apport de cette méthode est précieux afin d'arriver à des observations fines.

6.2.3. Les points lumineux

Les différents points lumineux sur le site ont été obtenus à la suite d'une demande auprès de l'Administration des ressources immobilières (ARI) de l'Université de Liège. Les données obtenues (V. Loiseau, comm. pers., 2025) sont antérieures au Plan Lumière du Sart-Tilman réalisé entre 2017 et 2019. Les plans du Plan Lumière ont également été fournis. Cette source de données ne recouvre pas l'ensemble du site d'étude mais se concentre sur les différents quartiers qui composent le Sart-Tilman.

Les données ont donc été croisées entre elles afin de les mettre à jour. Ensuite, les poteaux d'éclairage public du réseau routier régional wallon ont été rajoutés sur base d'une couche provenant de WalOnMap (Géoportail de la Wallonie, 2022a). Le réseau régional n'inclut pas les poteaux d'éclairage de l'ensemble des voiries du site. Seules les routes nationales sont intégrées mais pas de façon exhaustive. Par exemple, les données sur la Route du Condroz ne sont pas disponibles aux abords de Bonnelles. Une fois la base de données mise à jour, un croisement entre la pollution lumineuse observée et la présence de points lumineux est réalisé. L'objectif est de vérifier si chaque point d'éclairage est identifiable et si la végétation ne cache pas d'informations sur les axes routiers.

La dernière source de données vis-à-vis des points lumineux est une source provenant également de WalOnMap (Géoportail de la Wallonie, 2021). Cette source identifie les points lumineux de l'éclairage public communal qui sont potentiellement superflus et/ou inutilement gênants pour la biodiversité. Ces points lumineux sont classés en trois niveaux par ordre de

priorité d'action. La priorité varie, notamment, en fonction de la priorité du point lumineux à des sites d'intérêts biologiques comme les SGIB, les zones Natura 2000 ou la RNA du Sart-Tilman. Les points lumineux ont été identifiés en 2020, ce qui concorde avec les données satellitaires en présence.

6.2.4. Les photos de terrain

Des photos sur le terrain ont été prises sur deux sites principaux de la zone d'étude, sur le campus et aux abords du CHU. Durant la nuit du 16 au 17 avril 2025, dix-neuf photos ont été réalisées. Les points d'intérêts ont été choisis durant la visite de terrain, en sélectionnant des points jugés pertinents pour décrire l'éclairage sur les sites. De plus, le campus a été priorisé car en dehors des voiries principales, il semble peu éclairé. Le CHU, le rond-point Marcel Florkin ainsi qu'une partie du Science Park ont également été photographiés. Ces photos servent à observer l'impact visuel de l'éclairage au sol et à comparer les différents types d'infrastructures présentes sur le site du Sart-Tilman.

Afin de réaliser un suivi des photos, l'extension de QGis, QField a été utilisée. Cette extension permet d'importer un projet QGis sur un téléphone et d'ajouter des informations dans celui-ci. L'application QField sur le téléphone permet ensuite à l'utilisateur de se déplacer au sein du projet grâce à sa localisation, à l'instar d'un GPS. Une orthophoto du site ainsi que l'emprise de la luminosité observée par satellite ont été importées afin de pouvoir observer les résultats des traitements sur l'image satellite. Pour chaque photo prise, un point était créé automatiquement aux coordonnées précises et annoté avec une description et l'heure de la photo. Les photos ont été prises avec un Canon EOS 550D sans utiliser le flash. Certaines photos sont présentées dans la figure 8. Cet échantillon démontre la diversité d'éclairage présent sur le site d'étude. Les lampadaires de routes principales comme sur le rond-point Simone David Constant sont de couleur froide en comparaison avec les autres éclairages. Le rond-point Marcel Florkin est doté de luminaires avec des couleurs bleues et vertes. Au sein du campus, différents types de points lumineux sont présents, traduisant les objectifs souhaités comme la mise en valeur ou l'aide au déplacement.

Les photos ont également été légèrement traitées dans le logiciel GIMP qui permet de retoucher des images. Afin de mieux discerner les zones éclairées au sein des photos, les couleurs de l'image sont converties en niveaux de gris, tout en conservant la perception lumineuse de l'œil

humain. Cette étape suit une logique similaire à celle utilisée dans le traitement de l'image satellite. Le logiciel GIMP propose cette conversion à l'aide d'une formule différente :

$$Luminance = (0.22 \times R) + (0.72 \times G) + (0.06 \times B)$$

où R, G et B correspondent respectivement aux valeurs des pixels dans le canal rouge, vert et bleu de l'image originale. Ensuite les valeurs de luminance sont inversées afin de transformer les zones claires en zones sombres et inversement.



Figure 8 : Echantillon de photos prises durant la nuit du 16 au 17 avril 2025 : a) deux lampadaires situés sur le rond-point Simone David Constant, b) façade du B4, c) B7a et allée vers le B6d, d) chemin entrant dans la RNA du Sart-Tilman, le B5a est situé sur la gauche, e) parkings et bâtiments du CHU, f) éclairages du rond-point Marcel Florkin.

6.2.5. Les données d'occupation du sol

L'occupation du sol est un élément important pour l'analyse de l'impact de la pollution lumineuse. En effet, à intensité équivalente, la lumière a des impacts différenciés selon l'occupation du sol. La donnée sélectionnée est issue de WalOnMap (Géoportail de la Wallonie, 2022b) car la couche date de 2020, comme les données satellitaires. La couche d'occupation du sol s'appuie sur les orthophotos de 2020, un modèle numérique de hauteur et les données de référence de la couche de 2018. La résolution spatiale est de 1 m et présente initialement onze classes d'occupation. Le raster a été ensuite rééchantillonné (méthode du plus proche voisin) afin de correspondre à la résolution spatiale des données satellitaires. La classification du raster est disponible dans le tableau 2. Lors de la construction des trames du réseau écologique du Sart-Tilman, Gillet *et al.*, (2024) ont exploité les données d'écotopes issues du projet LifeWatch-WB. Ce projet utilise des données d'orthophotoplans de la Wallonie ainsi que celles issues du lidar et des données satellitaires de Sentinel. Les écotopes ont ensuite été croisés avec l'emprise des bâtiments issue du cadastre et la structure du réseau routier.

Tableau 2 : Classification des pixels de la couche d'occupation du sol issue du Géoportail de Wallonie (2022b).

Classification originale
Revêtement artificiel au sol
Constructions artificielles hors sol
Réseau ferroviaire
Sols nus
Eaux de surface
Couvert herbacé en rotation dans l'année
Couvert herbacé toute l'année
Résineux (> 3m)
Résineux (\leq 3m)
Feuillus (> 3m)
Feuillus (\leq 3m)

Néanmoins, l'identification des forêts sur le territoire ne semble pas être optimale et ce, au profit de la couverture herbacée. La RNA, qui est une zone forestière, est majoritairement intégrée dans la classe de couvert herbacé. Un croisement avec des données du PICC (Programme informatique de cartographie continue) a été réalisé afin d'améliorer la précision de l'occupation du sol (Géoportail de Wallonie, 2025). Les données du PICC ne permettent cependant pas de différencier les surfaces forestières résineuses et celles feuillues mais ont permis d'ajouter des nuances qui seront nécessaires pour la suite de ce travail. Les voiries ont été différenciées en trois classes distinctes – route principale, route communale et chemin – et les plans d'eau ont été rajoutés.

Pour réaliser le croisement, les couches reprenant les forêts et bosquets, les voiries, le réseau ferroviaire, les plans d'eaux et le bâti ont été rasterisées. Un tampon de 15 mètres est appliqué autour du tracé des autoroutes et nationales, un tampon de 5 mètres autour des routes communales et un tampon de 2,5 mètres autour des voiries reprises en tant que chemins. Une fois ces couches rasterisées, un nouveau raster d'occupation du sol est créé dans ArcGis en alignant les pixels des différents rasters sur base du raster d'occupation du sol initial. La classification finale est présentée dans la figure 9.

Occupation du sol du site d'étude, 2020

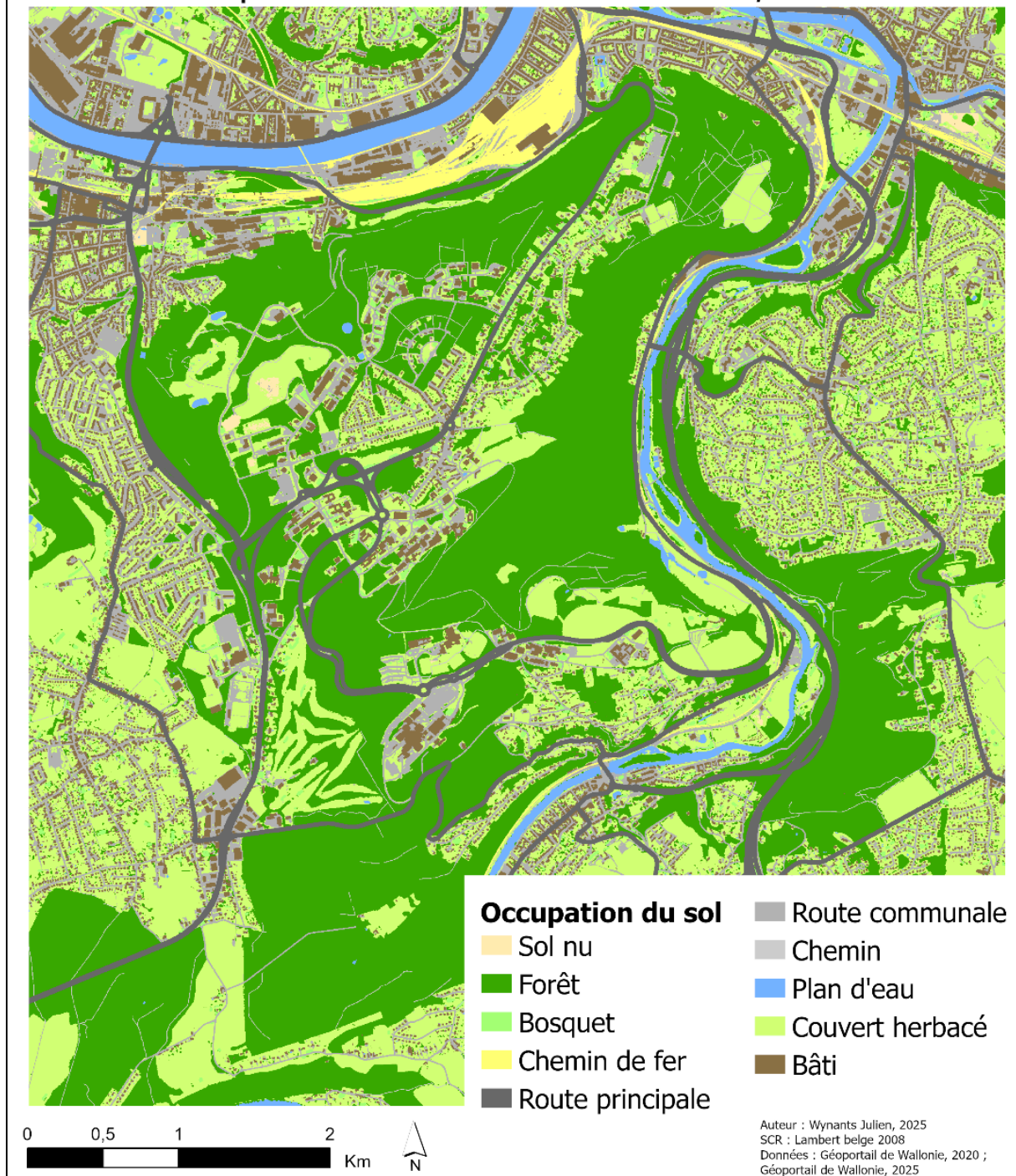


Figure 9 : Cartographie de l'occupation du sol sur base des données disponibles sur WalOnMap (Géoportail de la Wallonie, 2022b ; 2025). Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

6.2.6. Le réseau écologique existant

L'Université de Liège au travers de l'Administration des Ressources Immobilières (ARI) s'est dotée de son propre projet de réseau écologique, comme évoqué dans le chapitre 5 de ce mémoire. Bien que le projet d'étude soit postérieur à la date des données satellitaires, le réseau de 2024 est retenu comme source de données car il constitue un élément intéressant à comparer avec la pollution lumineuse.

Le réseau écologique utilisé ici est le réseau opérationnel. Ce réseau se construit sur base du réseau écologique fonctionnel qui symbolise les dynamiques spatio-temporelles des espèces présentes dans chacune des trames thématiques qui composent le réseau (Gillet *et al.*, 2024). Ce réseau permet de définir la connectivité potentielle des noyaux d'habitats identifiés en déterminant des corridors et des obstacles. Une fois le réseau écologique fonctionnel défini, le réseau opérationnel est construit sur cette base. Gillet *et al.* (2024) définissent le réseau opérationnel comme suit : « *il s'agit d'une cartographie planologique intégrant prioritairement les enjeux biologiques des différentes trames en tenant compte d'enjeux socio-économiques éventuels et de la réalisation potentielle de services écosystémiques, en un réseau écologique cartographié en zones aux priorités de gestion hiérarchisée* ». Dès lors, les enjeux socio-économiques du territoire sont confrontés aux enjeux de biodiversité afin d'intégrer ceux-ci dans le Schéma d'Aménagement du Sart-Tilman.

Afin de définir les trames thématiques nécessaires au réseau écologique, des espèces modèles sont sélectionnées pour chaque trame grâce aux données d'observations et à leur capacité de déplacement. Le choix des espèces est important car elles doivent être sensibles à la fragmentation de leur habitat. L'espèce doit également être indicatrice de la qualité des habitats et être une espèce parapluie, ce qui signifie que sa protection ainsi que celle de son territoire permettent de protéger d'autres espèces.

De manière plus détaillée, le réseau écologique est découpé en quatre trames thématiques (Gillet *et al.*, 2024) :

- Les forêts feuillues reprenant les habitats composés d'au moins 75% d'espèces indigènes. Les forêts feuillues sont réparties dans deux sous-trames. La première regroupe les forêts feuillues adaptées à des conditions d'humidité intermédiaires, appelées forêts mésophiles. L'espèce modèle de cette trame est le lucane cerf-volant (*Lucanus cervus*). La seconde sous-trame comprend les forêts adaptées à une humidité

plus élevée et nommées forêts humides. Les forêts incluses dans cette sous-trame doivent contenir des ruisseaux et l'espèce modèle est la salamandre tachetée (*Salamandra salamandra*) (Gillet *et al.*, 2024).

- Les milieux ouverts secs qui regroupent les pelouses et landes sèches. L'espèce modèle de la trame est le criquet à ailes bleues (*Oedipoda caerulescens*).
- Les prairies qui sont également des milieux ouverts mais mésophiles et avec des sols plus riches permettant une végétation herbacée plus dense.
- Les lisières formant un milieu de transition entre les surfaces forestières et celles des milieux ouverts.

La trame des prairies et celle des lisières ont été représentées par le réseau écologique opérationnel sans passer par le réseau écologique fonctionnel car ces trames sont influencées par la gestion humaine. Cette gestion empêche l'identification uniquement par orthophotoplans (Gillet *et al.*, 2024).

Le lucane cerf-volant est une espèce qui combine une activité diurne et crépusculaire. Durant la journée, les individus marchent et se reposent tandis que la période crépusculaire est exploitée pour les vols et la dispersion sur des plus grandes distances (Tini *et al.*, 2017). Selon Tini *et al.* (2017), ce pic d'activité coïncidant avec des conditions optimales de température et d'humidité. La salamandre tachetée est, quant à elle, une espèce nocturne (Denoël, 1996) à l'inverse du criquet à ailes bleues qui est plutôt diurne (Kral, 2010). Dès lors, l'intérêt d'inclure l'impact des lumières artificielles nocturnes sur les trames thématiques et en particulier la trame forestière se révèle être pertinent. De plus, Gillet *et al.* (2024) citent également la présence de plusieurs espèces de chauves-souris au sein du site d'étude. La majorité des espèces est particulièrement dépendante de la trame forestière feuillue mais des activités ont été observées aussi dans les autres trames thématiques du réseau.

Présentation des trames thématiques

Chaque habitat intégré dans une trame thématique est défini en tant que zone centrale (ZC) ou zone de développement (ZD). Les ZC représentent les surfaces accueillant les populations d'espèces et les biotopes ciblés par le réseau écologique à travers chaque trame. Ces sites nécessitent un statut de protection et ont pour seule fonction de conserver la nature (Gillet *et al.*, 2024). Une ZD correspond à une zone où des activités socio-économiques sont autorisées tant qu'elles sont compatibles avec la mise en avant du développement de la biodiversité. Un site présentant un intérêt connu pour la biodiversité mais dont la taille est inférieure à la taille minimale vitale nécessaire pour l'espèce est également considéré comme une zone de développement. De plus, les habitats ayant la possibilité de devenir un espace intégré dans la trame en tant que ZC ou ZD sont présentées comme des zones au potentiel restaurable (r). Les différentes trames sont présentées ci-dessous dans les figures 10 à 13. Il faut noter que des zones potentielles ont également été proposées par Gillet *et al.* (2024) dans le zonage de la sous-trame des forêts feuillues mésophiles ainsi que dans celui de la trame des milieux ouverts. Ces zones n'ont pas été vérifiées sur le terrain mais se basent sur des analyses cartographiques et ont été intégrées dans les données afin de couvrir une zone plus étendue.

La trame majeure du site d'étude est celle des forêts feuillues. La sous-trame des forêts feuillues humides recouvre 41% de la surface du Sart-Tilman et 29% de la surface du buffer autour du site. Le réseau est structuré par trois zones centrales principales présentes dans le site d'étude visibles sur la figure 10. Ces zones présentent une connectivité relativement faible entre le nord du site avec le bois de Saint-Laurent et la RNA du Sart-Tilman et le sud avec le bois de la Vecquée ainsi que les bois de Nomont et Famelette. Ces discontinuités peuvent partiellement être réduites avec la réhabilitation des ZCr identifiées. Les ZCr sont d'ailleurs majoritairement dans la RNA ainsi que dans la partie sud des limites du Sart-Tilman.

La présence de zones de développement proches du Clos Mercator et du Science Park présentent également des opportunités d'améliorer la connectivité de la sous-trame des forêts humides.

Zonage opérationnel de la sous-trame des forêts feuillues humides du réseau écologique du Sart-Tilman, 2025

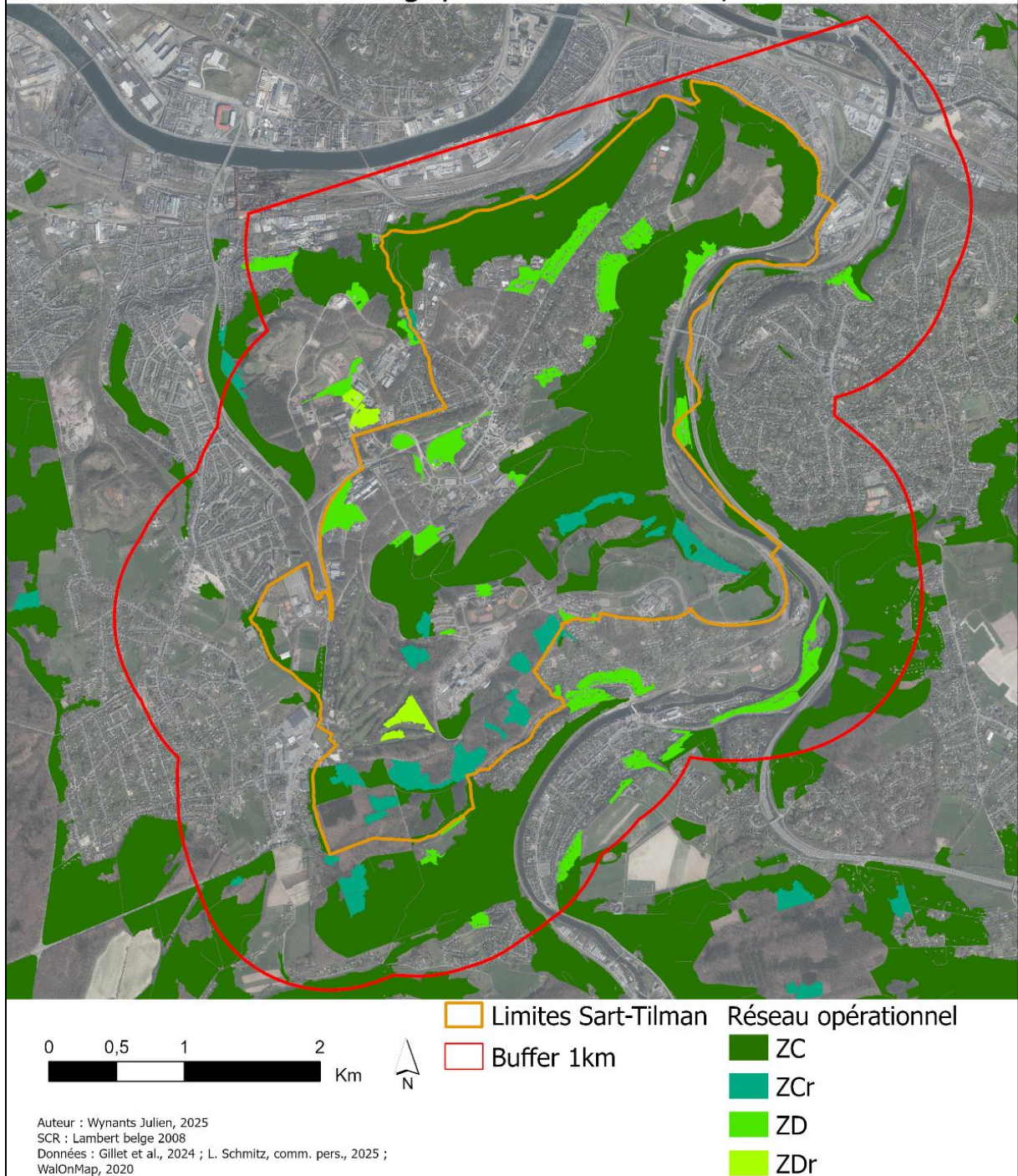


Figure 10 : Représentation du zonage opérationnel de la sous-trame des forêts feuillues humides du réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

La sous-trame des forêts feuillues mésophiles recouvre une surface plus importante que celle des forêts humides. En effet, en cumulant l'ensemble des classes du réseau opérationnel, la sous-trame occupe 58% du Sart-Tilman et 41 % de la surface du buffer. De plus, en comparant les figures 10 et 11, les zones centrales se confondent entre les deux sous-trames. La réserve naturelle agréée du Sart-Tilman est discernable et est la zone centrale majeure du site. Le site Natura 2000 de la Vallée de l'Ourthe entre Comblain-au-Pont et Angleur contribue également dans plusieurs ZC. Au nord, le bois de Saint-Laurent est aussi bien présent en tant que ZC. Les zones urbanisées regroupent les zones de développement en reprenant les jardins boisés (Gillet *et al.*, 2024) et les abords du campus. Par rapport à la sous-trame des forêts humides, la sous-trame mésophile est plus intégrée au campus à travers des zones de développement, notamment au sein du quartier Polytech ainsi qu'autour du Science Park.

Les forêts feuillues mésophiles présentent de nombreuses tâches d'habitats qui sont bien connectées entre elles. La liaison est également bonne avec les zones d'habitats naturels en dehors du site d'étude bien que les connections soient plus aisées sur l'axe nord-sud que sur l'axe est-ouest.

Zonage opérationnel de la sous-trame des forêts feuillues mésophiles du réseau écologique du Sart-Tilman, 2025

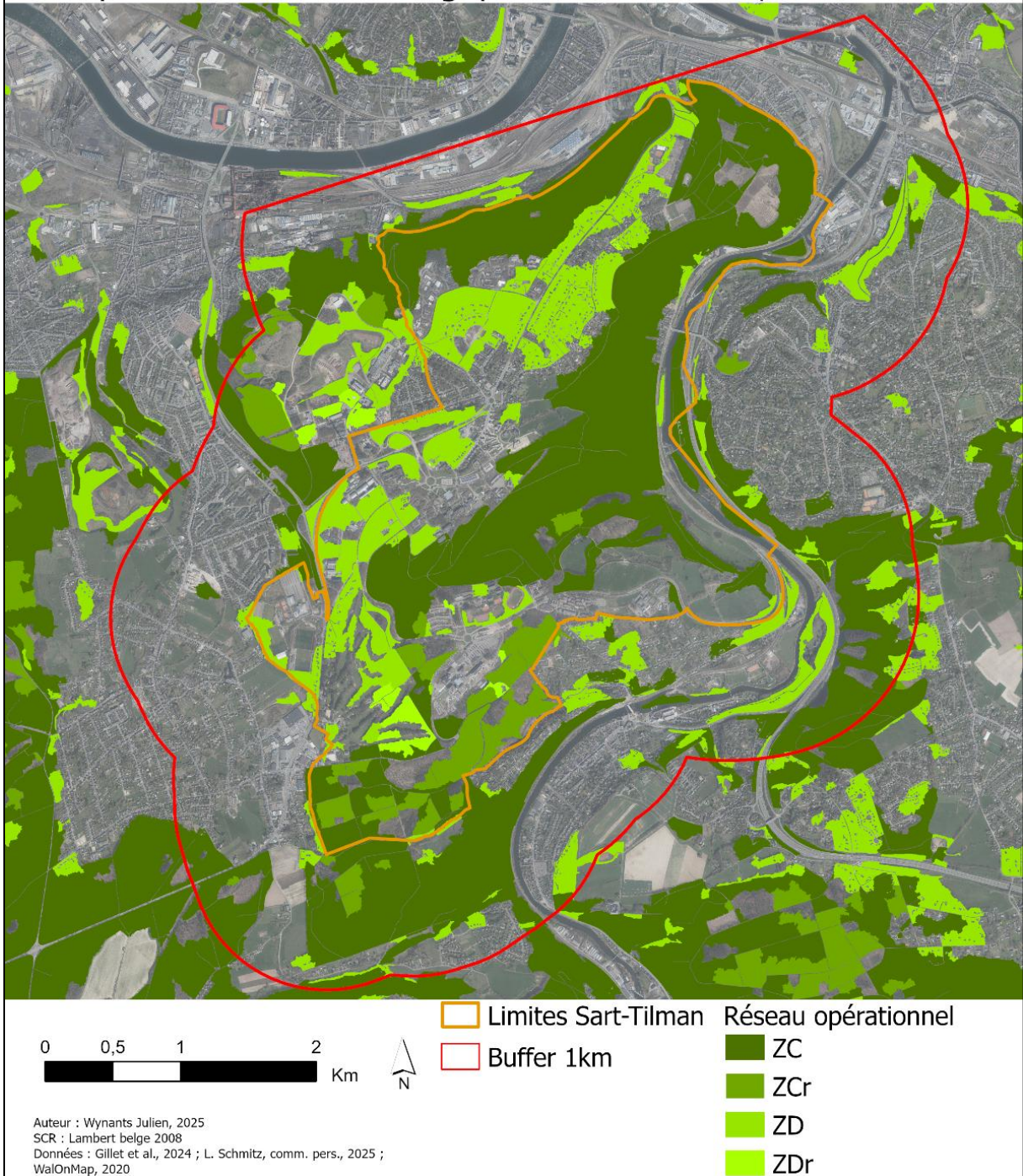


Figure 11 : Représentation du zonage opérationnel de la sous-trame des forêts feuillues mésophiles du réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

La trame des milieux ouverts secs et celle des lisières sont présentées dans la figure 12. Ces deux trames sont bien moins représentées que la trame des forêts feuillues. La trame des lisières recouvre respectivement 4% de la surface au sein des limites du Sart-Tilman et 3% de la surface du buffer. La majorité des zones identifiées sont classées comme zones centrales restaurables, ce qui indique que peu de lisières sont gérées de façon efficace pour permettre d'abriter des espèces typiques. Les ZC présentes sur le site se situent en aval du ruisseau du Blanc Gravier et aux abords de la rue d'Ougrée, au nord du périmètre d'étude. Les zones centrales restaurables sont localisées proches du château de Colonster et autour du campus. Les zones de développement sont également peu représentées sur le territoire.

Pour ce qui est des milieux ouverts secs, ils occupent moins de 3% du territoire au sein des limites du Sart-Tilman et 4% de la surface du buffer. Les habitats principaux de la trame sont uniquement présents au nord du site. La zone centrale principale est située dans la Lande de Streupas. D'autres ZC sont observables, une sur un terroir du bois de Saint-Laurent et une vers le Bol d'Air. Néanmoins, ces sites sont peu connectés, à l'inverse de la Lande de Streupas qui est connectée avec le réseau existant au nord du site d'étude.

Zonage opérationnel des trames des lisières et des milieux ouverts secs du réseau écologique du Sart-Tilman, 2025

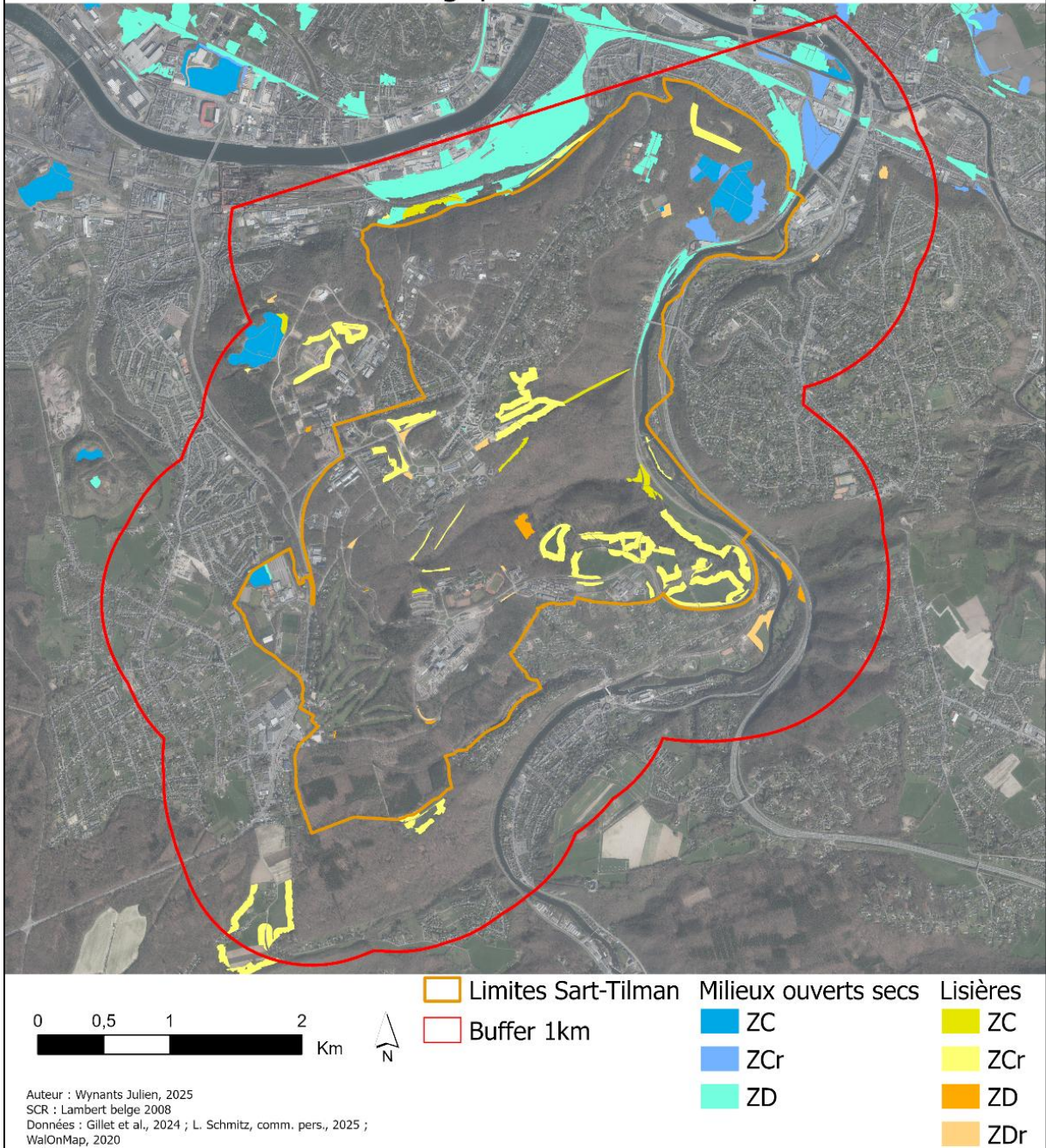


Figure 12 : Représentation du zonage opérationnel des trames des milieux ouverts secs et des lisières du réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

La dernière trame qui compose le réseau écologique du Sart-Tilman est celle des prairies et est présentée dans la figure 13. Cette trame partage des sites avec les trames des lisières et des milieux ouverts secs comme la Lande de Streupas, le terril du bois de Saint-Laurent ainsi que les alentours du château de Colonster. De plus, la trame des prairies présente également de nombreuses ZCr où une gestion plus extensive permettrait de grandement renforcer la structure de la trame. Les zones de développement sont observables au sein même du campus, tout comme des ZDr. Au total, la trame des prairies recouvre 10% de la surface au sein des limites du Sart-Tilman et 6% de la surface totale du buffer.

Des connections existent entre les deux versants du Blanc Gravier mais cette connectivité s'estompe en dehors de la zone citée.

Zonage opérationnel de la trame des prairies du réseau écologique du Sart-Tilman, 2025

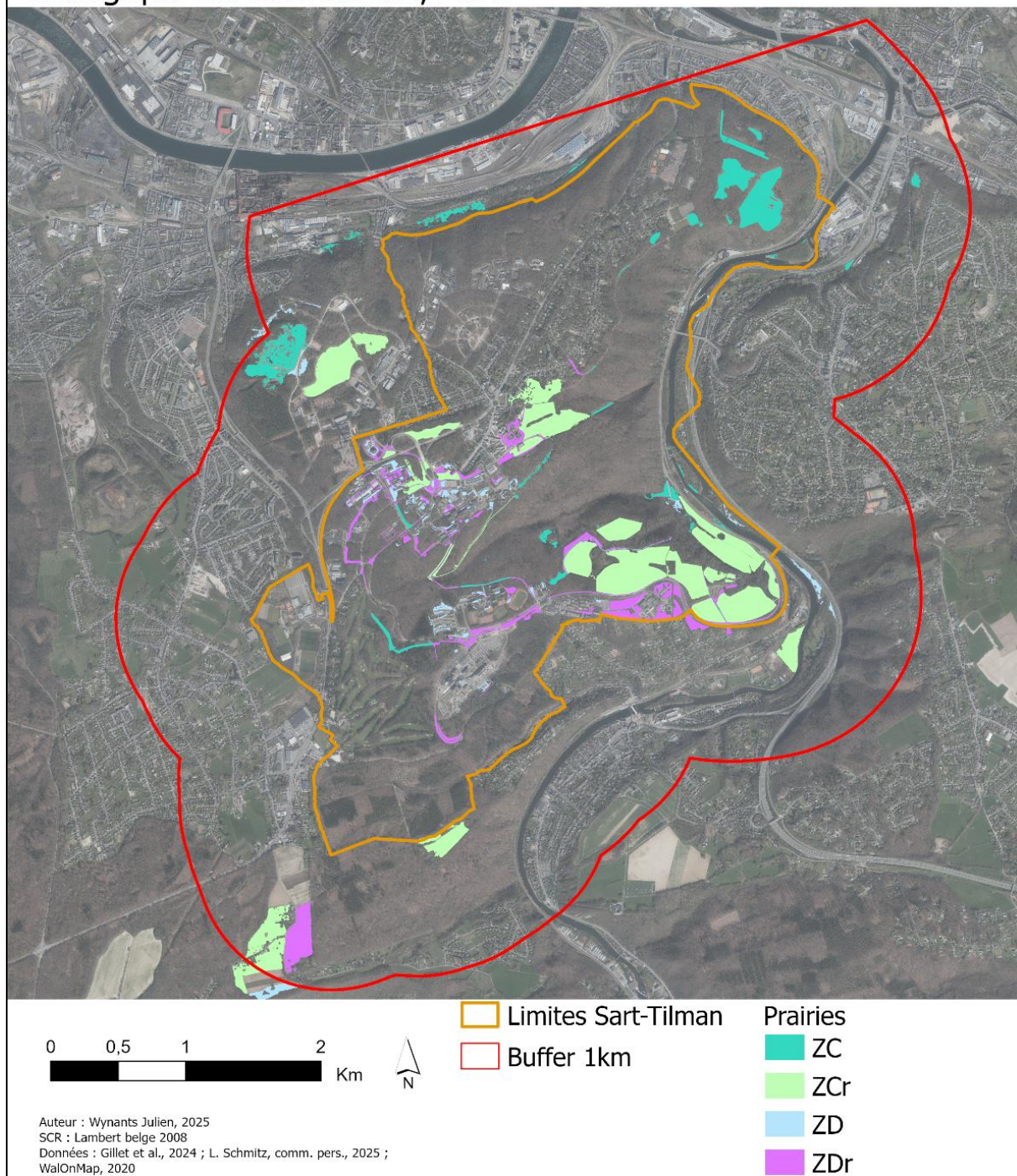


Figure 13 : Représentation du zonage opérationnel de la trame des prairies du réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

En conclusion, le réseau écologique du Sart-Tilman est composé de quatre trames reliées entre elles. La trame des forêts feuillues est celle qui domine le paysage grâce à la zone centrale au sein de la réserve naturelle agréée du Sart-Tilman ainsi qu'aux sites Natura 2000 et aux bois alentours. Le réseau opérationnel a mis en avant des zones centrales où l'enjeu prioritaire est la biodiversité et des zones de développement où les activités humaines doivent prendre en compte les enjeux de biodiversité (Gillet *et al.*, 2024).

La connectivité est également un élément essentiel pour maintenir la biodiversité sur le territoire et se traduit par la présence de corridors écologiques. La connectivité de la trame des forêts feuillues est différente entre les deux sous-trames. D'un côté, la sous-trame forestière mésophile bénéficie d'une bonne connectivité sur l'entièreté de la trame. Ces corridors sont présentés dans l'annexe 2. De l'autre côté, la sous-trame humide est divisée en deux sections, entre la partie sud au niveau du CHU et le reste du site. De plus, en observant les corridors existants, le bois de Saint-Laurent et le bois de Saint-Jean n'ont pas de corridors les reliant avec la RNA du Sart-Tilman, ce qui signifie que le réseau est encore plus morcelé. Le constat est similaire pour la trame des milieux ouverts secs qui est composée d'une zone centrale, au sein de la Lande de Streupas, isolée au sein du site d'étude. Enfin, les trames des lisières et des prairies n'ont pas de corridors identifiés. Les lisières sont composées essentiellement de ZCr avec une connectivité très faible sur le territoire. Les prairies présentent des zones centrales très éloignées entre elles. Néanmoins, cette trame possède un potentiel important avec de nombreux sites qui pourraient contribuer à renforcer la trame une fois restaurés. La trame forestière feuillue et la trame des milieux ouverts secs possèdent également des corridors restaurables. Un corridor est considéré comme restaurable si ce chemin est physiquement accessible en termes de longueur mais fonctionnellement inaccessible pour l'espèce car le déplacement est rendu trop coûteux par des obstacles. À l'inverse, un corridor existant est un chemin dont la longueur et le coût de déplacement sont inférieurs aux capacités de l'espèce (Gillet *et al.*, 2024).

Afin d'évaluer l'impact de la pollution lumineuse sur le réseau écologique déjà existant, le zonage des différentes trames sera croisé avec l'emprise calculée de la pollution lumineuse dans le but d'observer si cette pollution dégrade les habitats identifiés. L'opération sera également réalisée sur les corridors écologiques mis en évidence entre les zones des forêts feuillues mésophiles, celles des forêts feuillues humides et celles des milieux ouverts secs.

6.2.7. Les espèces étudiées

Chaque espèce présente sur le site d'étude possède une sensibilité différente à la pollution lumineuse. Les espèces nocturnes et crépusculaires semblent les plus impactées au vu des raisons évoquées dans le chapitre 2.2. où des perturbations dans les déplacements, l'alimentation, la reproduction sont notamment évoquées.

Un des ordres les plus emblématiques des espèces nocturnes est celui des chiroptères. Sur le Sart-Tilman, un inventaire des chauves-souris a été réalisé entre le 21 mars 2023 et le 6 septembre 2023 par des agents du Département de la nature et des forêts (DNF) sur 51 lieux de pose au sein du site d'étude et sur 5 zones à proximité du site (Gillet *et al.*, 2024 ; L. Schmitz, comm. pers., 2025). Les lieux de pose ont été sélectionnés en amont afin de maximiser les opportunités de contact tout en couvrant suffisamment l'ensemble du territoire (Gillet *et al.*, 2024). Les données ont été prises à l'aide d'enregistreurs puis traitées avec le logiciel SonoChiro et validées par un agent du DEMNA (Département de l'Étude du milieu naturel et agricole).

Au total, 17 espèces de chauves-souris ont été enregistrées en comptabilisant l'entièreté des données. Néanmoins, lors de la classification des données, tous les contacts n'ont pas abouti à l'identification d'une espèce finale. Si l'enregistrement ne permettait pas d'identifier le genre de l'espèce, l'enregistrement était classé comme indéterminé. De plus, bien que l'identification ait permis majoritairement de déduire le genre, l'espèce exacte n'a pas été identifiée dans la plupart des cas. De ce fait, les données ont été regroupées à l'échelle des genres. Les données plus précises sont disponibles dans l'annexe 3 ainsi que la caractérisation de la position des données pondérées d'enregistrements. Les espèces de pipistrelles représentent une large part des observations et majoritairement des pipistrelles émettant à haute fréquence comme les pipistrelles communes (*Pipistrellus pipistrellus*). Les espèces de pipistrelles sont distinguées par leur fréquence d'émission. Une fréquence plus élevée apporte une meilleure perception de l'espace, ce qui est plus adapté à un vol lent dans un paysage avec de nombreux obstacles comme dans une forêt ou une haie. Ces espèces favorisent une traque de leurs proies. À l'inverse, les pipistrelles émettant à une fréquence moins élevée sont associées à un vol rapide et une chasse aérienne.

Parmi les espèces ayant été identifiées sur le site, certaines possèdent un statut de protection selon la liste rouge des espèces wallonnes (Natagora, 2021). Le petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*) est considéré comme en danger (EN). Quatre espèces sont vulnérables (VU) avec le grand murin (*Myotis myotis*), la noctule commune (*Nyctalus noctula*), l'oreillard gris (*Plecotus austriacus*) et le grand rhinolophe (*Rhinolophus ferrumequinum*). Six espèces sont quasi menacées (NT) et quatre présentent une préoccupation mineure (LC).

Néanmoins, toutes les espèces de chauves-souris ne sont pas sensibles de la même façon à la lumière artificielle. En effet, la sérotine commune (*Eptesicus serotinus*) affiche une réponse positive à l'augmentation de l'intensité lumineuse à l'inverse du murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*) et de la pipistrelle de Nathusius (*Pipistrellus nathusii*). Pour cette dernière, un seuil de $20 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ est défini par Laforge *et al.* (2019). Ce seuil correspond au moment où l'espèce réduit ses activités sous l'effet de l'éclairage.

Les données ont été croisées avec les trames du réseau écologique afin de différencier les habitats préférentiels pour chaque genre de chauves-souris. Les données ont été spatialisées dans ArcGis Pro à l'aide des coordonnées des postes d'enregistrements puis, pour chaque genre, une intersection spatiale entre les sites ayant enregistré au moins une rencontre et les surfaces occupées par chaque trame du réseau écologique a été réalisée.

Un croisement avec les gîtes d'été et d'hiver identifiés par le pôle Plecotus de Natagora n'a pas été réalisé car les données disponibles ne sont pas suffisamment précises pour pouvoir situer les gîtes. De plus, une demande pour obtenir les données plus précises a été faite mais n'a pas abouti avant la fin de ce travail.

6.3. Mise en évidence de la pollution lumineuse

Une fois l'image satellite traitée, la pollution lumineuse peut être mise en évidence. L'objectif est de décrire la structure spatiale de la pollution lumineuse au sein du site d'étude. Afin de mettre en évidence le lien entre la présence de lumière et les routes sur le territoire, un raster calculant la distance euclidienne entre chaque pixel et la route principale la plus proche est généré sur ArcGis. Les autoroutes et routes nationales sont considérées comme les routes principales structurant le territoire. Ces routes correspondent aux routes principales dans la figure 9, représentant l'occupation du sol. Ce raster a ensuite été fusionné avec le raster de

luminosité afin d'associer à chaque pixel sa luminosité et sa distance à la route. La table d'attributs a ensuite été extraite pour traiter les données. Les distances ont été classées par intervalles de 50 mètres où la luminosité moyenne a été recalculée. Enfin, un graphique représentant la luminosité moyenne en fonction de la distance aux routes est construit.

Les classes d'occupation du sol ont également été différenciées sur base d'une analyse statistique afin d'identifier les classes les plus touchées par l'éclairage. Le raster d'occupation du sol (voir fig. 9) a été combiné avec le raster d'intensité lumineuse (voir fig. 14) et la table d'attributs extraite. Pour chaque classe d'occupation du sol, la moyenne, la médiane, l'écart type et le coefficient de variation (CV) de luminosité sont calculés. Ensuite, un indice d'asymétrie (skewness) est calculé comme suit :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{EC} \right)$$

où n représente le nombre de pixels de la classe d'occupation du sol, x_i représente une valeur de luminosité d'un pixel, \bar{x} est la moyenne d'intensité lumineuse de la classe étudiée et EC représente l'écart type. Cet indice mesure l'asymétrie de la distribution des valeurs de luminosité par rapport à la moyenne. De ce fait, si l'indice est supérieur ou inférieur à zéro, la distribution présente une asymétrie dont la queue s'étend vers des valeurs respectivement élevées ou faibles. Un indice supérieur à zéro signifie donc que les valeurs élevées sont rares au sein de la distribution qui est plutôt orientée vers des faibles valeurs et inversement pour un indice négatif. En revanche, si l'indice se rapproche de zéro, les valeurs faibles et élevées sont symétriques autour de la moyenne. Enfin, le pourcentage de surface illuminée par classe d'occupation du sol est calculé sur base du nombre de pixels éclairés par classe. L'ensemble de ces indices permet de caractériser la distribution spatiale de la pollution lumineuse par type d'occupation du sol.

Ensuite, nous avons essayé d'identifier les types d'éclairage sur base d'un indice utilisant les canaux rouge, vert et bleu de l'image nocturne. L'indice de classification est proposé par Sánchez de Miguel *et al.* (2019) et identifie les sources lumineuses sur base de deux rapports. Le premier est le rapport de la bande bleue sur la bande verte, le second est celui de la bande verte sur la rouge afin de construire un diagramme « couleur-couleur » qui permet de discriminer chaque source lumineuse sur base de son spectre lumineux caractéristique.

Les deux ratios ont été calculés sur base de l'image nocturne après calibration radiométrique pour chaque pixel identifié comme éclairé.

Enfin, le terme « pollution lumineuse » employé dans cette section englobe l'entièreté de la lumière artificielle nocturne. Ce choix est justifié par le seuil minimal de $85 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ choisi pour les valeurs de l'image satellite. En effet, au vu des observations de Laforge *et al.* (2019) qui tendent vers une diminution des activités des pipistrelles de Nathusius vers $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ et des murins de Daubenton après un seuil encore inférieur, il semble cohérent de considérer l'ensemble de la luminance observée. De plus, la littérature scientifique qui s'intéresse aux conséquences de l'éclairage sur la biodiversité nocturne englobe généralement l'entièreté de l'éclairage dans le processus.

6.4. Zones de conflit

L'objectif de ce mémoire étant principalement de mettre en place une méthode fonctionnelle, différentes approches ont été réalisées. Pour construire la trame noire, nous appliquerons la méthode déductive (Sordello, 2017 ; Sordello *et al.*, 2021) afin de profiter de l'expertise offerte par le réseau écologique déjà existant. La structure relevée de la pollution lumineuse sera intégrée au réseau écologique afin d'identifier les points de conflits potentiels. Cette structure, peut être vue comme une trame lumineuse qui représente les barrières aux déplacements des espèces. La trame lumineuse du Sart-Tilman a été identifiée sur base de l'emprise de la luminosité observée, calculée dans le chapitre 6.3.1 et les points lumineux à notre disposition. La trame lumineuse se compose de deux structures différentes. La première représente le tracé de la lumière effectivement observée au travers de l'image satellite. La seconde est une structure théorique, réalisée sur base des points lumineux qui ne sont pas à proximité de la lumière observée.

Bien que ce ne soit que purement théorique, des points lumineux sont présents sur le territoire et ont pu ne pas être détectés par le satellite pour diverses raisons. Par exemple, le lampadaire présente un dispositif réduisant la part de lumière émise vers le haut et l'intensité est trop faible pour être détectée. La végétation peut également empêcher les émissions vers le haut ainsi que la présence de nuages et bien que l'image satellite soit prise dans les meilleures conditions possibles, les métadonnées ne donnaient pas d'informations sur la couverture nuageuse. Il est également possible que le point lumineux soit purement décoratif et ne soit pas assez puissant

pour être détecté, ce qui est le cas sur le campus. Enfin, le point peut également ne pas être en service au moment du passage du satellite. Cette extension théorique de la trame lumineuse a été réalisée en effectuant une intersection entre la luminosité observée et un tampon de quinze mètres autour de chaque point d'éclairage. Le tampon permet de réaliser l'intersection en mitigeant les biais de position causés par le géoréférencement et la position des points d'éclairage. La valeur arbitraire s'inspire en partie des observations réalisées par Angerand (2021). Une fois l'intersection réalisée, une sélection inverse est appliquée afin de conserver les points d'éclairage qui ne sont pas à proximité de surfaces éclairées. Un tampon de sept mètres à cette fois-ci été appliqué autour de ces points puis la couche a été rasterisée. Cette distance arbitraire ne discrimine pas les différents types d'éclairage regroupés au sein de la couche car la base de données ne permet pas dans l'état actuel de préciser de manière sûre. Dès lors, un tampon de sept mètres ne représentera pas la réalité mais permet néanmoins une approche et une visualisation de l'impact de ces autres points lumineux.

De plus, les photos nocturnes démontrent bien que même les luminaires de décoration et de mise en évidence ont une emprise notable dans le paysage nocturne. Cette trame potentielle permet également d'apporter une nuance et un degré de priorité lors de la mise en place de corridors noirs.

Une fois ce traitement effectué, le raster a été fusionné avec un raster composé des pixels éclairés et un raster recouvrant l'ensemble du territoire afin de symboliser l'environnement non éclairé. Chaque pixel du raster final appartient donc à une des trois classes possibles : la trame lumineuse confirmée, la trame lumineuse basée sur la présence de points lumineux non observés par l'image satellite ou à la surface non éclairée.

Ensuite, l'emprise de la trame lumineuse est utilisée afin d'observer les surfaces du réseau écologique opérationnel qui sont éclairées. Le processus est répété avec les corridors écologiques. Les traitements sont réalisés dans ArcGis Pro en réalisant des intersections spatiales entre les différentes couches.

Pour évaluer l'impact des lumières artificielles nocturnes sur les chauves-souris, Azam *et al.* (2018) recommandent un écart d'au moins cinquante mètres entre les corridors écologiques ainsi que les taches d'habitats naturels et les points lumineux. Pour réaliser cette observation, un tampon de cinquante mètres est donc appliqué à tous les points lumineux du site. Bien que cela implique de considérer tous les éclairages comme identiques, cette simplification peut être réalisée.

En effet, l'intention est d'évaluer l'impact potentiel de l'éclairage afin de justifier la prise en compte de l'éclairage nocturne dans le réseau écologique. Pour les points lumineux dont la fonction de mise en valeur peut être vérifiée, un tampon de vingt-cinq mètres est appliqué. De plus, afin de conserver les données de luminosité du satellite, la trame lumineuse observée est conservée dans la couche. Une fois les tampons réalisés, ces derniers seront utilisés afin de découper les différentes sous-trames et corridors pour observer l'emprise des tampons sur le réseau écologique.

7. Résultats

7.1. Mise en évidence de la pollution lumineuse

7.1.1. Traitements de l'image satellite

La pollution lumineuse observée est représentée dans la figure 14. Une première observation visuelle permet de constater que la majorité de la luminosité se situe sur les axes routiers du paysage. De plus, bien que le gradient d'intensité soit large, allant de 85 à 4956, la majorité des valeurs se situe plutôt vers la borne inférieure. Une observation de l'histogramme des pixels compris dans la zone « Buffer 1km » de la figure 15 permet d'évaluer la répartition des valeurs. Plus de 35 % des pixels ont une valeur de luminosité entre 85 et 100 $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$.

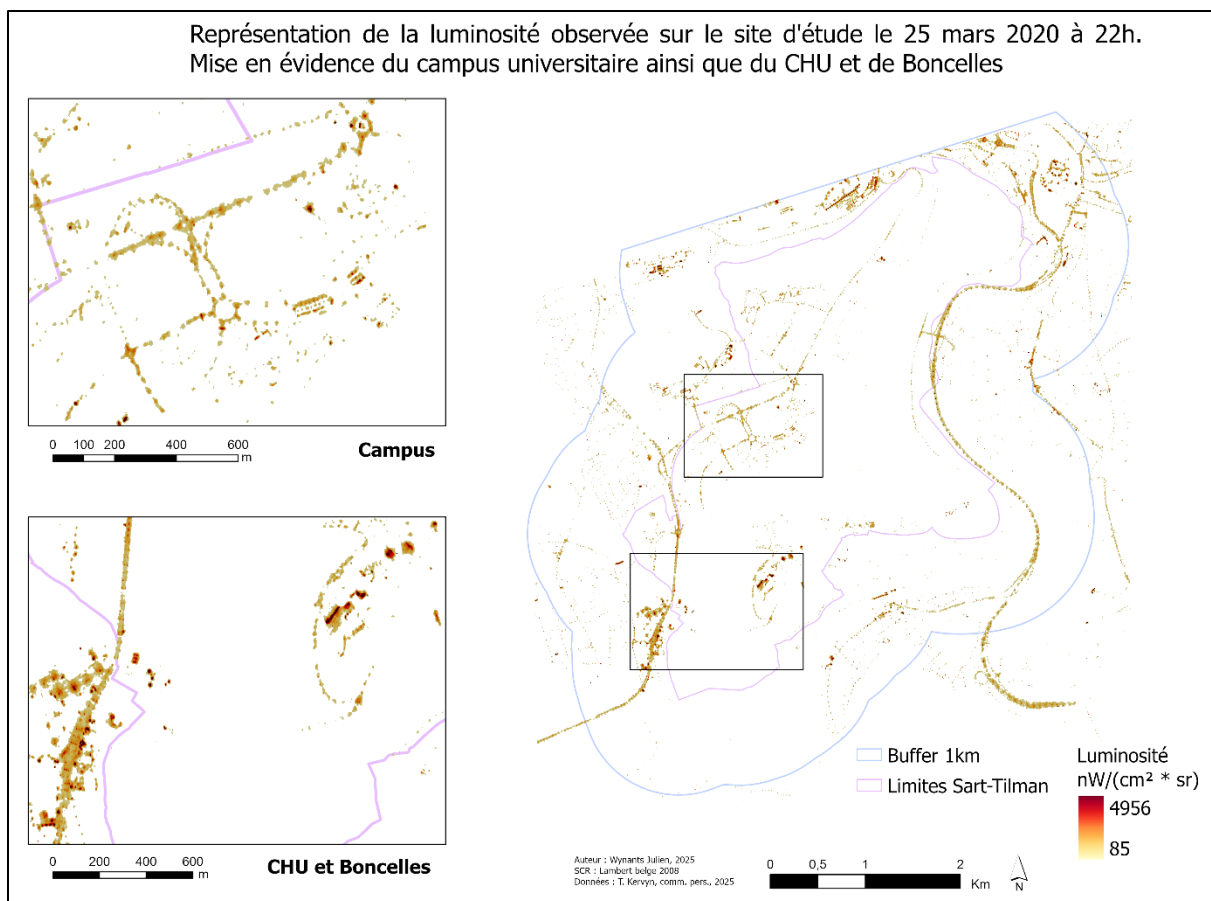


Figure 14 : Représentation cartographique de la luminosité par pixel au sein du site d'étude. Deux gros plans sont réalisés respectivement sur le campus du Sart-Tilman et sur le CHU et Bonnelles. Auteur : WYNANTS Julien, 2025

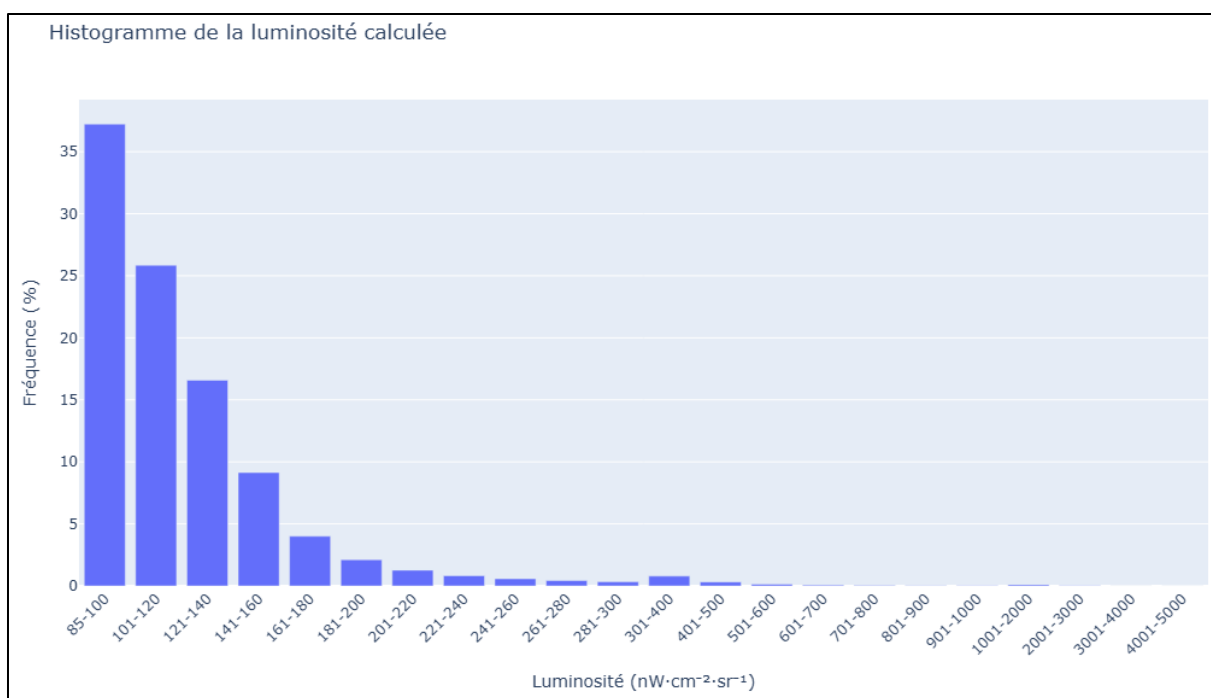


Figure 15 : Histogramme de la luminosité calculée. L'axe des X représente les différentes valeurs de luminosité obtenues. Ces valeurs sont regroupées en classes à largeur variable. L'axe des Y représente le nombre de pixels par classe de luminosité sous la forme de fréquence. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

En termes de surface éclairée, la pollution lumineuse recouvre 3,3 % de la zone buffer, en recouvrant plus de 1 km². La tendance est identique sur la surface du Sart-Tilman où la surface éclairée recouvre 0,23 km² soit plus de 2 % de la surface totale.

La radiance observée se limite majoritairement aux axes de circulation routière. Sur le plateau, la route du Condroz traverse le Sart-Tilman et la E25 est mise en évidence en contrebas. Le campus ainsi que le CHU sont également visibles. La RNA du Sart-Tilman semble peu impactée. Globalement, la radiance observée se cantonne donc aux surfaces artificialisées. Les valeurs les plus élevées sont au niveau du CHU et de Boncelles. Sur le campus, la lumière est relativement contenue aux routes et aux parkings. Toutefois, des tâches sont visibles sur les abords qui correspondent aux bâtiments universitaires. La luminosité confirmée correspond à la trame lumineuse qui est également distinguable sur la figure 17.

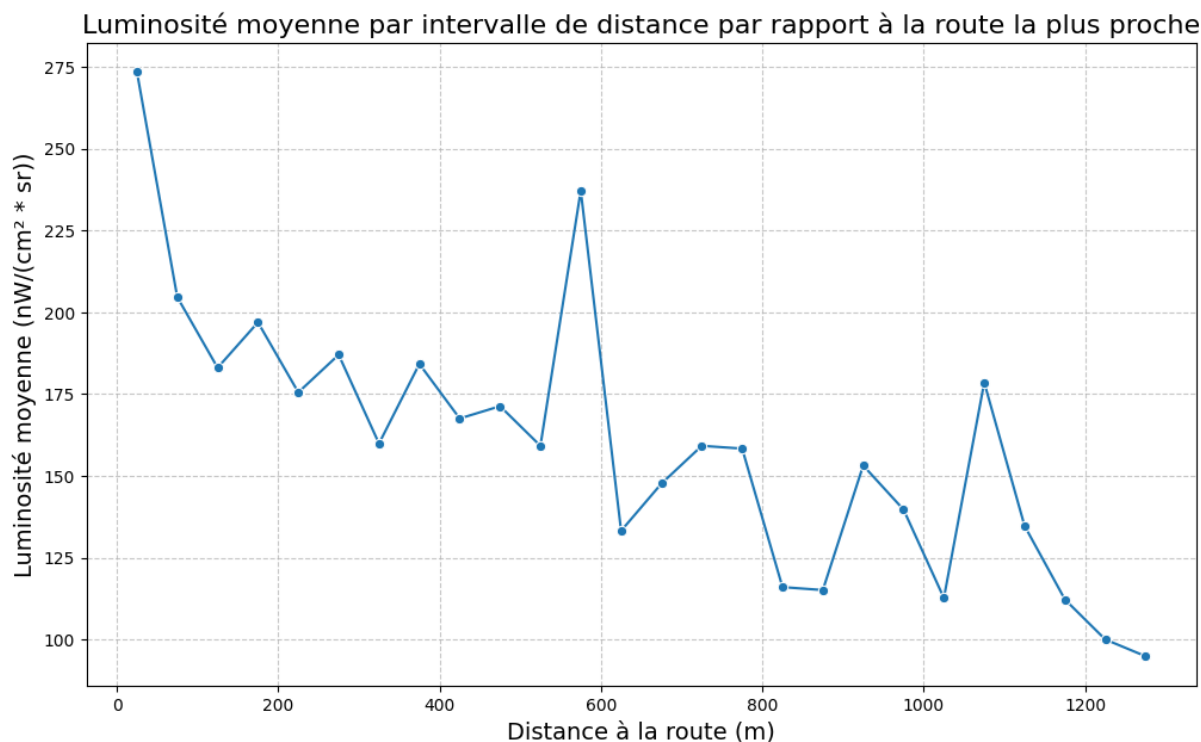


Figure 16 : Représentation graphique de la luminosité observée moyenne par intervalle de distance par rapport à la route la plus proche. L'axe des X représente la distance entre chaque pixel et la route la plus proche. L'axe des Y représente la luminosité moyenne des pixels ayant la distance à la route identique. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

La figure 16 permet de constater que la luminosité décroît au fur et à mesure que la distance avec une route principale s'accroît. Deux pics se distinguent vers 600 mètres et vers 1100 mètres. Ces pics s'expliquent par le fait que les routes communales ne sont pas intégrées dans les routes. La route menant au CHU ainsi que les routes du Science Park ne sont pas prises en compte. Néanmoins, la tendance générale s'oriente vers la décroissance des valeurs de luminosité avec l'augmentation de la distance.

Tableau 3 : Distribution de la luminosité observée sur le site d'étude. Les colonnes Min et Max représentent respectivement la valeur minimale et maximale de luminosité, exprimée en $nW\cdot cm^{-2}\cdot sr^{-1}$, pour chaque classe d'occupation du sol. La colonne CV reprend les valeurs d'écart-type et la colonne Aplatissement correspond aux valeurs de l'indice skewness mentionné dans la méthodologie. Le pourcentage de surface éclairée correspond à la part de surface lumineuse par classe d'occupation.

Classes d'occupation	Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-type	CV	Aplatissement	Surface (%)
Sol nu	86	254	132	118	43	0,33	1,1	0,1
Forêt	85	4781	119	100	115,5	0,97	20,3	7
Bosquet	85	1078	121	106	58	0,48	8,2	1
Chemin de fer	85	817	137	121	62,6	0,46	3,6	3,9
Route principale	85	4371	118	106	48,2	0,41	21,8	42,5
Route communale	85	4897	133	112	103	0,78	17,4	25,5
Chemin	86	471	112	100	40	0,36	4,7	0,2
Plan d'eau	85	547	121	104	48,5	0,40	3,8	0,3
Couvert herbacé	85	3799	128	104	102,1	0,80	15,3	9,1
Bâti	85	4956	143	113	144,1	1,01	14,9	10,4

Différents indicateurs statistiques ont été calculés pour chaque classe d'occupation du sol défini sur le territoire. Les résultats sont présentés dans le tableau 3. Plusieurs constats peuvent être déduits des résultats statistiques. Tout d'abord, toutes les classes affichent une valeur minimale aux alentours de 85 qui est également la valeur seuil minimale observable de luminosité. Les valeurs maximales varient bien plus. Ensuite, les zones bâties présentent la valeur la plus élevée (4956) suivies par les routes communales (4897) et les forêts (4781). La valeur maximale de la classe « Forêt » est surprenante. En analysant les données, cette valeur est située à la limite d'un bâtiment du club de golf, qui est lui-même un des sites possédant les valeurs de luminosité les plus élevées sur le Sart-Tilman. Les classes « Sol nu », « Bosquet » et « Plan d'eau » ont des valeurs maximales bien plus faibles mais représentent également une part faible de la surface éclairée.

Malgré des maxima différents, les moyennes sont relativement identiques, ce qui indique que même les classes avec un maximum élevé sont majoritairement composées de valeurs qui restent faibles. Ce constat confirme l'observation réalisée avec la figure 15, où plus de 75 % des valeurs de luminosité sont inférieures à 140. Le fait que la médiane soit inférieure à la moyenne pour toutes les classes indique que la distribution des valeurs de luminosité est étalée vers les valeurs élevées. Les valeurs élevées semblent plus exceptionnelles, ce qui reste cohérent avec nos observations précédentes.

L'écart-type varie considérablement entre les classes. Les classes "Bâti" (144), "Forêt" (116), "Couvert herbacé" (102), "Route communale" (103) indiquent une grande variabilité, à l'inverse des classes "Chemin" (40) et "Route principale" (48) où les valeurs sont regroupées autour de la moyenne et sont plus homogènes.

Il est intéressant de noter que les routes principales présentent un écart-type relativement faible avec des valeurs de luminosité élevées, ce qui démontre la présence d'éclairages constants au sein de cette classe. Les classes "Route principale" et "Route communale" ont des moyennes relativement similaires (118 vs 133), mais leur coefficient de variation est très différent (0,41 vs 0,78), ce qui indique que la "Route communale" a une variabilité beaucoup plus grande par rapport à sa moyenne. Globalement, les valeurs du coefficient de variation confirment les observations précédentes, tout comme les valeurs d'aplatissement. En effet, tous les résultats sont positifs et certains sont même supérieurs à 10. Les classes avec les valeurs d'aplatissement les plus élevées sont celles qui affichent des maxima et des coefficients de variation élevés. Ceci démontre la concentration de valeurs de luminosité faibles avec des pics plus élevés occasionnels.

Néanmoins, tous ces constats doivent être interprétés en regardant le pourcentage de surface éclairée par classe d'occupation. Les classes "Route principale" (42,5%) et "Route communale" (25,5%) représentent une part très importante de la surface totale. Le « Bâti » (10,4%) et le « Couvert herbacé » (9,1%) sont également significatifs. La présence des routes principales et communales confirme que le réseau routier est le principal facteur de fragmentation, créant des coupures dans les continuités écologiques nocturnes par la présence d'éclairages routiers. Les routes sont donc des barrières structurant le territoire nocturne, complétées par les zones bâties dont l'intensité lumineuse est plus élevée mais plus variable comme le montre le coefficient de variation (1,01). Les forêts représentent 7 % des surfaces éclairées mais majoritairement proches des lisières et des infrastructures anthropiques. Néanmoins, la présence de lumière, même à des valeurs relativement faibles, reste un élément critique et important à mettre en avant dans la construction d'un réseau écologique.

7.1.2. Traitements des photos nocturnes

En supplément des analyses statistiques, les photos prises sur le terrain ont permis d'affiner la compréhension de l'éclairage présent sur le site. Tout d'abord, il existe différentes fonctions pour l'éclairage. Il peut être fonctionnel, décoratif ou pour mettre en valeur. Ensuite, plusieurs types d'éclairages sont présents. De plus, les photos ont été prises à une heure plus tardive que l'image satellite (entre une et deux heures plus tard). La figure 17 présente la localisation des photos prises sur le terrain. Certains points sont dans l'emprise de la luminosité observée sur le site. Sur le campus, des points se situent dans des zones considérées comme sombres pour le satellite.

La présentation des résultats des photos est effectuée dans l'ordre chronologique des prises de photos. La première photo a été prise à 23h03 à proximité du parking B et la dernière à 00h15 au Science Park.

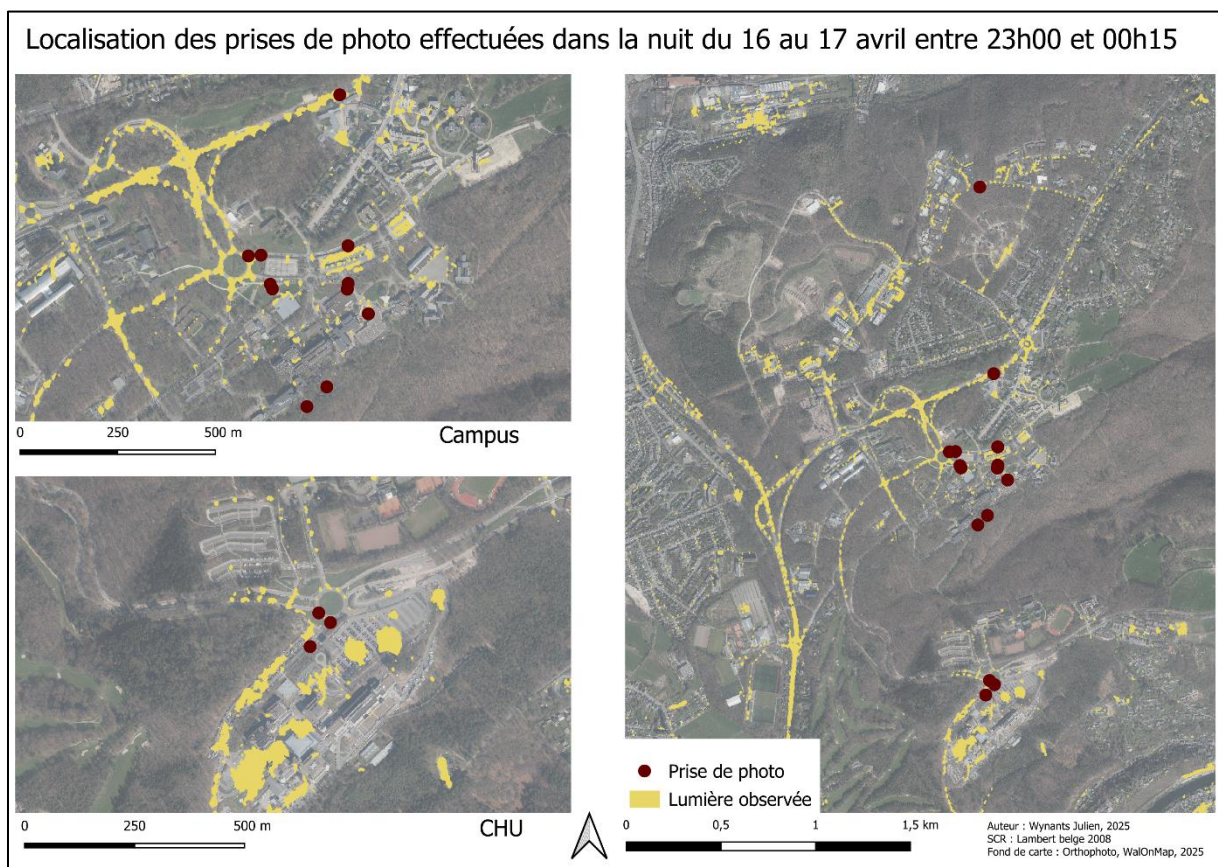


Figure 17 : Localisation des photos réalisées sur le terrain dans la nuit du 16 au 17 avril 2025. La lumière observée correspond à la luminosité observée sur l'image satellite et déjà présentée dans la figure 14. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Sur le campus, les parkings sont éclairés à l'étage supérieur et illuminent partiellement la route adjacente et la pelouse de l'autre côté de la route. Selon les observations satellites, la route n'était pas éclairée. Dans le fond de la figure 18.b, le rond-point Simone David Constant est distinguable grâce aux lampadaires qui correspondent aux taches noires. En se déplaçant à côté du parking à pied, l'étage du bas s'est éclairé ainsi que celui du parking A, proche du rond-point. Malgré l'angle de prise de vue différent, nous constatons sur la figure 19.c que le parterre entre la route et le parking est désormais entièrement éclairé. Cet éclairage automatique s'éteint néanmoins après un certain temps sans détecter de mouvements.

Les halos lumineux montrent également que les lampes éclairent dans toutes les directions. Dès lors, l'éclairage semble peu efficace car une partie de l'énergie utilisée ne sert pas à éclairer ce qui est nécessaire. L'observation est identique à proximité du rond-point Simone David Constant présenté à la figure 19. L'éclairage du rond-point est du LED de 5000 ou 6000 K. Les voiries communales sont éclairées avec des couleurs plus chaudes vers les 3000 K. Le halo lumineux autour des LED blancs froids est plus large (fig. 19), ce qui est normal au vu de la plus grande diffusion des longueurs d'ondes bleues que rouges dans l'atmosphère.



Figure 18 : Photos prises à proximité des parkings du Sart-Tilman sur le boulevard de Colonster. Les photos ont été prises à 23h03 et 23h04. a) photo du parking B, b) photo (a) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement, c) photo du parking B lorsque l'éclairage du bas est allumé. Auteur : WYNANTS Julien, 16 avril 2025.

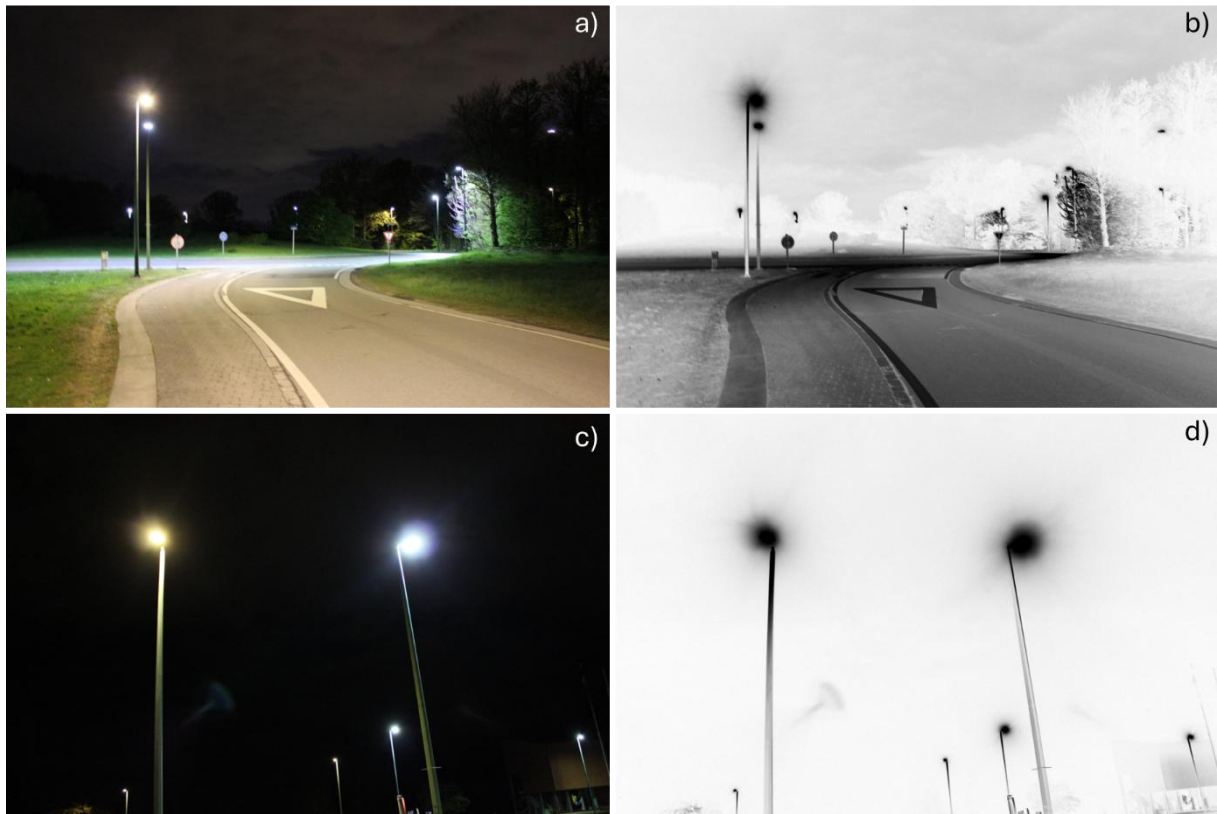


Figure 19 : Photos prises à proximité du rond-point Simone David Constant. Les photos ont été prises à 23h08 et 23h11. a) photo d'une partie du rond-point, b) photo (a) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement, c) photo de deux types d'éclairage, le lampadaire de couleur bleutée correspond à l'éclairage du rond-point, d) photo (c) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement. Auteur : WYNANTS Julien, 16 avril 2025.

Aux abords du B4, des éclairages de mise en valeurs sont disposés sur les façades. Des éclairages proches du sol encadrent le chemin menant au bâtiment. Sur l'image satellite, la façade est également considérée comme éclairée. La surface éclairée par les bornes lumineuses directionnelles au sol est très restreinte et elles n'émettent pas vers le haut, ce qui maximise l'efficacité de l'éclairage. Ce type de borne est également implanté sur le chemin d'entrée des homes étudiants. La figure 20 démontre la faible surface au sol impactée par l'éclairage. Le chemin lui-même n'est pas éclairé car l'objectif est plus de signaler que d'éclairer.

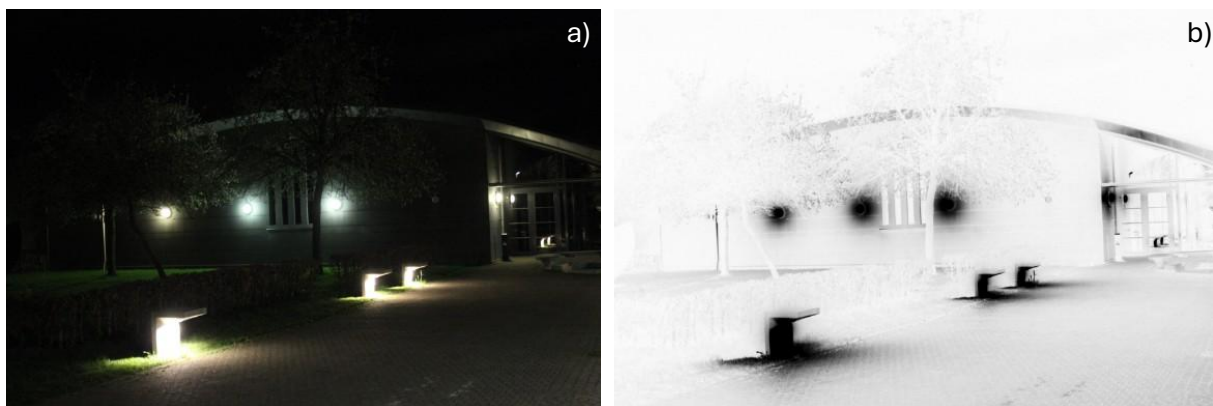


Figure 20 : Photo d'une façade du B4. La photo a été prise à 23h15. a) photo de la façade, b) photo (a) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement. Auteur : WYNANTS Julien, 16 avril 2025.

Ensuite, le quartier Agora présente de nombreux points lumineux relativement peu détectés par l'imagerie nocturne. La figure 21 présente le chemin descendant vers le B7 avec le restaurant universitaire situé sur la droite. L'éclairage est assuré par des pylônes dont l'extrémité est allumée. Des zones d'ombres sont présentes au pied même des pylônes. Le chemin semble plus éclairé que par rapport aux résultats de l'image satellite. De plus, d'autres points lumineux bien plus éblouissants sont présents. Les parterres à proximité sont illuminés sauf les zones protégées par le muret, sur le côté gauche de la figure 21.

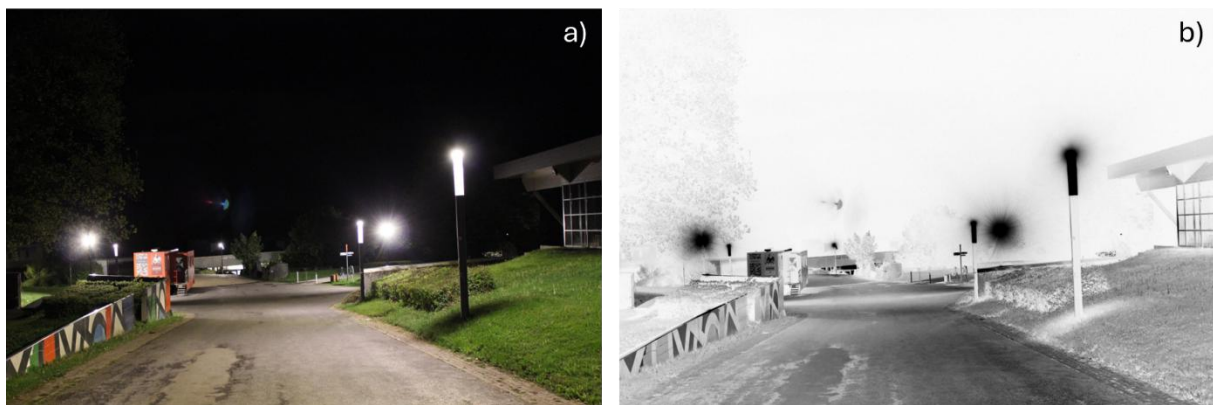


Figure 21 : Photo de l'allée descendant vers le restaurant universitaire et le B7a. La photo a été prise à 23h20. a) photo de de l'allée, b) photo (a) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement. Auteur : WYNANTS Julien, 16 avril 2025.

En descendant vers le B7a, l'origine d'une surface lumineuse relativement large pour le quartier Agora est identifiée. Il s'agit d'éclairages au sol disposés sur les marches d'un escalier, éclairant vers le haut un muret. La photographie associée est présentée dans l'annexe 4. Le B7a était

toujours éclairé à 23h40, au moment de la photo de la figure 22. Les chemins sont bien éclairés avec des pylônes et un spot très lumineux sur la façade du B6. En continuant en direction des bâtiments de physique, une peinture sur la façade du B7b est illuminée à l'aide d'éclairage au sol, éclairant vers le haut. La photo est disponible à l'annexe 5. Le trajet au sein du campus s'est terminé à l'entrée de la RNA du Sart-Tilman, derrière le B6. La figure 23 montre la dernière photo prise, à la distance maximale possible pour prendre une photo sans flash. L'entrée est légèrement éclairée mais l'impact s'estompe rapidement.



Figure 22 : Photo du B7a en direction des bâtiments de chimie. La photo a été prise à 23h43. a) photo de l'allée et du B7a, b) photo (a) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement. Auteur : WYNANTS Julien, 16 avril 2025.

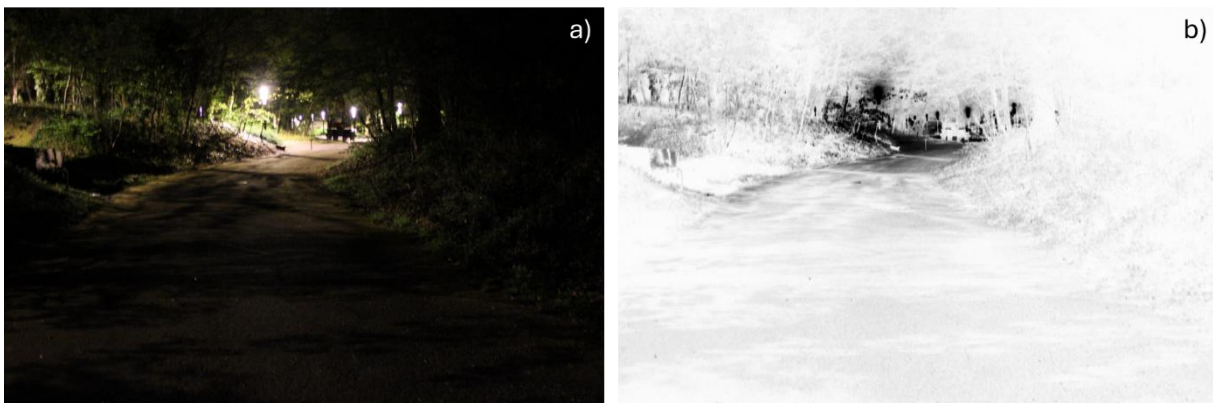


Figure 23 : Photo d'un sentier menant vers le B7b avec les bâtiments de physique sur la gauche et la RNA derrière. La photo a été prise à 23h38. a) photo du chemin, b) photo (a) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement. Auteur : WYNANTS Julien, 16 avril 2025.

La seconde partie du terrain s'est déroulé vers le CHU et le rond-point vers minuit. Avec l'image satellite, le site du CHU était déjà considéré comme éclairé, ce qui s'est confirmé avec les photos au sol. L'éclairage est fonctionnel et se justifie par la fonction d'hôpital. Les photos du site sont disponibles en annexe 6. Sur le rond-point Marcel Florquin, peu de lumière était observée par l'image satellite. Cela s'explique par la couleur de l'éclairage qui est vert jaune au

sommet et bleu dans les pylônes visibles sur la figure 24.a. Le rond-point semble bien éclairé en comparaison avec les observations satellites, avec un éclairage renforcé sur les sorties et entrées du rond-point. Cette accentuation de l'éclairage était également observable grâce au satellite, ainsi que l'éclairage en contact avec la lisière du bois de Sclessin en arrière-plan de la figure 24.c. Les couverts herbacés aux abords des routes sont aussi illuminés par l'éclairage.

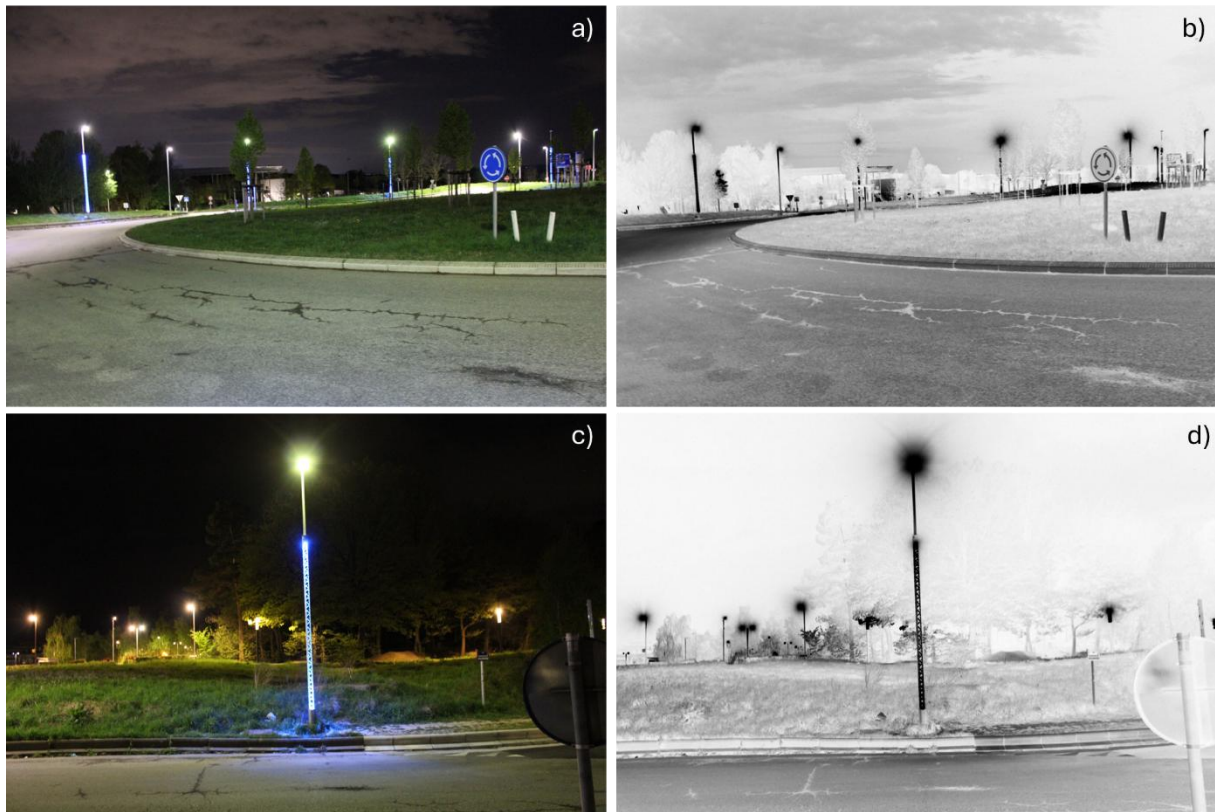


Figure 24 : Photos du rond-point Marcel Florkin et de son éclairage. Les photos ont été prises à 23h59 et 00h01. a) photo d'une partie du rond-point, b) photo (a) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement, c) photo d'un des lampadaires du rond-point, présentant un éclairage vert au sommet et bleu dans le pylône, d) photo (c) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement. Auteur : WYNANTS Julien, 16 et 17 avril 2025.

Enfin, les photos prises sur la route du Condroz et au Science Park confirment que les deux routes sont bien éclairées après minuit. Les lampes ont des caractéristiques similaires, de couleur blanc froid. Néanmoins, l'impact sur l'environnement proche est différent. Sur la route du Condroz, l'éclairage est assuré par des lampadaires de 12 mètres de haut (V. Loiseau, comm. pers., 2025) espacés de façon régulière et dont le faisceau semble concentré vers la chaussée. Sur la route du Science Park, les lampadaires sont de hauteur plus modeste et sont implantés en bordure de chaussée d'un côté uniquement. En conséquence, l'éclairage du Science Park éclaire plus l'environnement immédiat de la route. La comparaison entre les deux éclairages est présentée sur la figure 25 et les images originales sont disponibles en annexe 7.

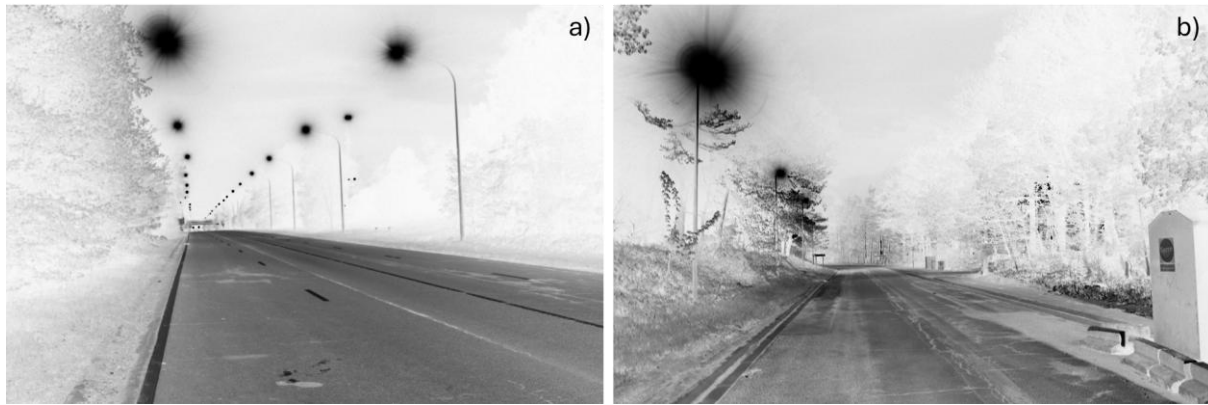


Figure 25 : Photos modifiées sur le logiciel GIMP. Les zones blanches correspondent aux zones sombres avant le traitement et inversement afin de mettre en évidence les points lumineux. a) photo de la route du Condroz à proximité du rond-point avec le restaurant Marco Polo. La photo originale a été prise à 00h06. b) photo de l'Avenue du Pré Aily au sein du Science Park. La photo originale a été prise à 00h10. Auteur : WYNANTS Julien, 17 avril 2025.

7.1.3. Différenciation des types d'éclairage

L'indice calculé afin d'identifier les types d'éclairages présents sur le site n'a pas rendu des résultats exploitables. En effet, les résultats sont surprenants car plus de 99 % des pixels sont classés dans les LED froids et les lampes aux halogénures métalliques, avec des températures proches de 4000 à 5000 Kelvin. Bien que la prédominance de lampes LED ne soit pas étonnante, le résultat semble trop prononcé. Plusieurs explications sont possibles : l'image n'est pas correctement traitée pour appliquer ce raisonnement, le SNR des bandes verte et bleue (25) ne permet pas de refléter la réalité ou alors, il est nécessaire avant de réaliser le traitement d'identifier les sources de lumières plus efficacement.

7.1.4. Traitements de l'inventaire des chiroptères

L'analyse des enregistrements de chauves-souris sur le Sart-Tilman a permis de mettre en évidence la présence importante de nombreuses espèces. Les résultats de l'intersection entre les trames du réseau écologique et les sites d'enregistrements sont présentés dans le tableau 4. Les pipistrelles émettant à une fréquence élevée dominent nettement les observations avec 80 % des contacts répartis sur 50 sites, principalement en forêts feuillues (31 sites) et en lisières (10 sites). Cette distribution concorde avec l'écologie généraliste de ce groupe, capable d'exploiter aussi bien les milieux boisés que les zones semi-ouvertes, notamment pour la chasse (Gillet *et al.*, 2024). Les pipistrelles à basse fréquence ainsi que les sérotines et noctules montrent une répartition similaire, bien qu'elles représentent respectivement à 1 % et 5 % des

enregistrements. Néanmoins, ces observations confirment leur capacité à utiliser une mosaïque d’habitats pour se déplacer et chasser.

Les murins et les oreillards sont des espèces qui dépendent plus des milieux boisés et des lisières. Leur présence au sein de milieux ouverts secs et les prairies restent néanmoins à noter, bien que leur stratégie de chasse soit plus adaptée aux milieux fermés (Gillet *et al.*, 2024).

Enfin, les rhinolophes se distinguent par leur rareté. En effet, seulement 10 contacts ont été enregistrés répartis sur 9 sites différents. Ces sites sont exclusivement dans des milieux forestiers ou aux lisières.

La concentration des observations dans les forêts et lisières s’expliquent également par la présence de gîtes d’hiver et d’été sur le site ainsi que des arbres morts et des bâtiments isolés qui présentent de nombreuses opportunités au repos et à la reproduction. De plus, plus de 13 % des observations se concentrent sur le site d’enregistrement de l’étang du Blanc Gravier, ce qui en fait un site de chasse majeur.

Tableau 4 : Espèces de chauves-souris contactées lors de l’inventaire du DEMNA sur le site du Sart-Tilman en 2023. Le nombre de rencontres est indiqué ainsi que le nombre de sites où les rencontres ont eu lieu. Les sites sont également répartis en fonction des trames thématiques du réseau écologique. Un même site d’enregistrement peut être inclus dans plusieurs trames. Il y a 35 postes d’enregistrements dans les forêts feuillues, 10 en lisière, 5 en commun pour les milieux ouverts secs et les prairies et 1 unique supplémentaire pour la trame des prairies. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Groupes d’espèces	Nombre de rencontre	Nombre de site	Forêts feuillues	Lisières	Milieu ouverts secs	Prairies
Chauves-souris indéterminées	14553	51	31	10	5	6
Sérotines et noctules	5953	51	31	10	5	6
Murins	749	39	22	8	2	3
Pipistrelles basse fréquence	1266	40	24	7	4	5
Pipistrelles haute fréquence	96014	50	31	10	4	5
Oreillards	178	34	20	7	2	3
Rhinolophes	10	9	6	3	0	0

7.2. Mise en évidence des points de conflits

Afin de mettre en évidence les zones de conflits entre l’éclairage et les espaces compris au sein du réseau écologique, la trame lumineuse est séparée en deux sous-trames dont la construction diffère. La trame lumineuse identifiée correspond à la lumière captée par le satellite.

La trame lumineuse potentielle regroupe l'ensemble des points lumineux qui ne sont pas à proximité de la luminosité calculée. Les deux trames sont observables dans la figure 26. La trame potentielle est constituée des éclairages des voiries annexes aux routes principales ainsi que les abords des bâtiments situés sur le versant gauche qui sont éclairés durant la nuit et/ou mis en évidence comme le B4 par exemple. Le constat est identique du côté du Blanc Gravier avec les éclairages des parkings ainsi que ceux du stade. Bien que ne restant pas allumés toute la nuit, cet éclairage temporaire peut perturber certaines espèces à proximité. Les points lumineux de l'éclairage public communal identifiés comme étant inutilement gênants pour la biodiversité sont intégrés dans les limites du Sart-Tilman. En effet, ces points ont, pour la majorité, été également identifiés par l'imagerie satellitaire et le reste est couvert par les couches de points lumineux à disposition.

Le CHU est intégré dans la trame identifiée, ce qui est logique au vu de l'activité autour du site et des besoins spécifiques en termes d'éclairage.

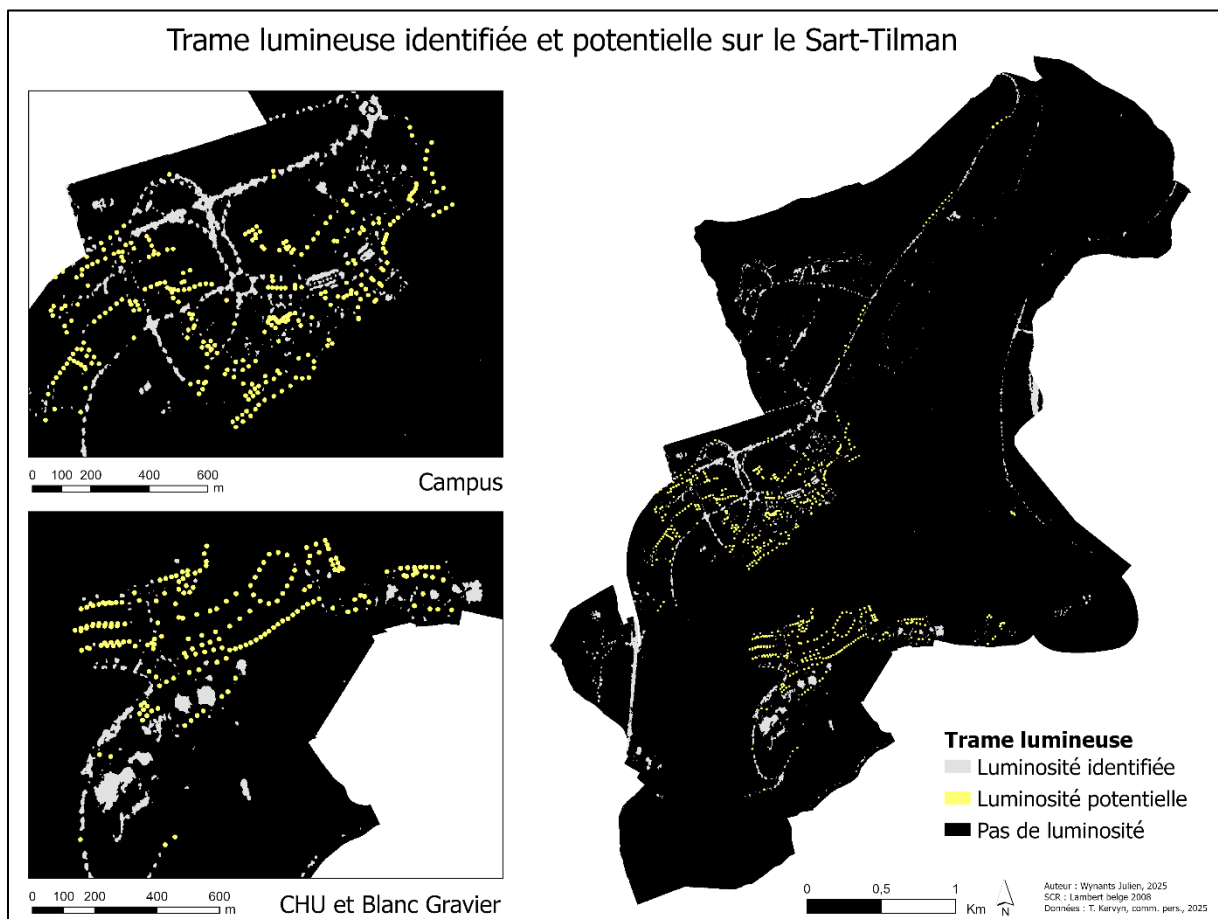


Figure 26 : Représentation cartographique de la trame lumineuse identifiée et de la trame lumineuse potentielle sur le site du Sart-Tilman. La trame potentielle n'est disponible qu'à l'échelle du Sart-Tilman au vu des données possédées. Deux gros plans sont présentés, l'un sur le campus du Sart-Tilman et l'autre sur le CHU et le quartier du Blanc Gravier. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

7.2.1. Intersections entre le réseau écologique opérationnel et la trame lumineuse

Toutes les trames du réseau écologique sont impactées par la pollution lumineuse. Les résultats des intersections entre la trame lumineuse et les différentes zones des trames du réseau écologique démontrent que l'impact est presque exclusivement situé aux limites externes des sites. Cela s'explique par la structure de la trame lumineuse. L'impact est également relativement faible. Les résultats majeurs sont présentés dans cette section et le reste des observations sont disponibles dans les annexes 8 à 10.

Au sein de la sous-trame des forêts feuillues humides, la luminosité identifiée affecte principalement les zones centrales en contact avec les routes structurant le paysage. La luminosité potentielle affecte plutôt des zones de développement comme celles intégrées au quartier Polytech ou à proximité de la RNA, au niveau des bâtiments de physique. Une zone de développement située au milieu d'une boucle de la route du Condroz, dans le cadran sud-ouest de la figure 27, est entièrement entourée par de la lumière. Aux abords du CHU et du Country Hall, deux zones centrales sont affectées sur les limites en contact avec la route. La zone centrale proche du Country Hall est d'ailleurs de forme longiligne ce qui accroît l'impact de la lumière. Les résultats des intersections de ce côté sont disponibles dans l'annexe 8.

En dehors du site d'étude, la trame identifiée intersecte la sous-trame des forêts feuillues humides à proximité des routes principales du territoire comme la route du Condroz (N63).

Intersections entre la trame lumineuse et la sous-trame des forêts feuillues humides sur le campus du Sart-Tilman

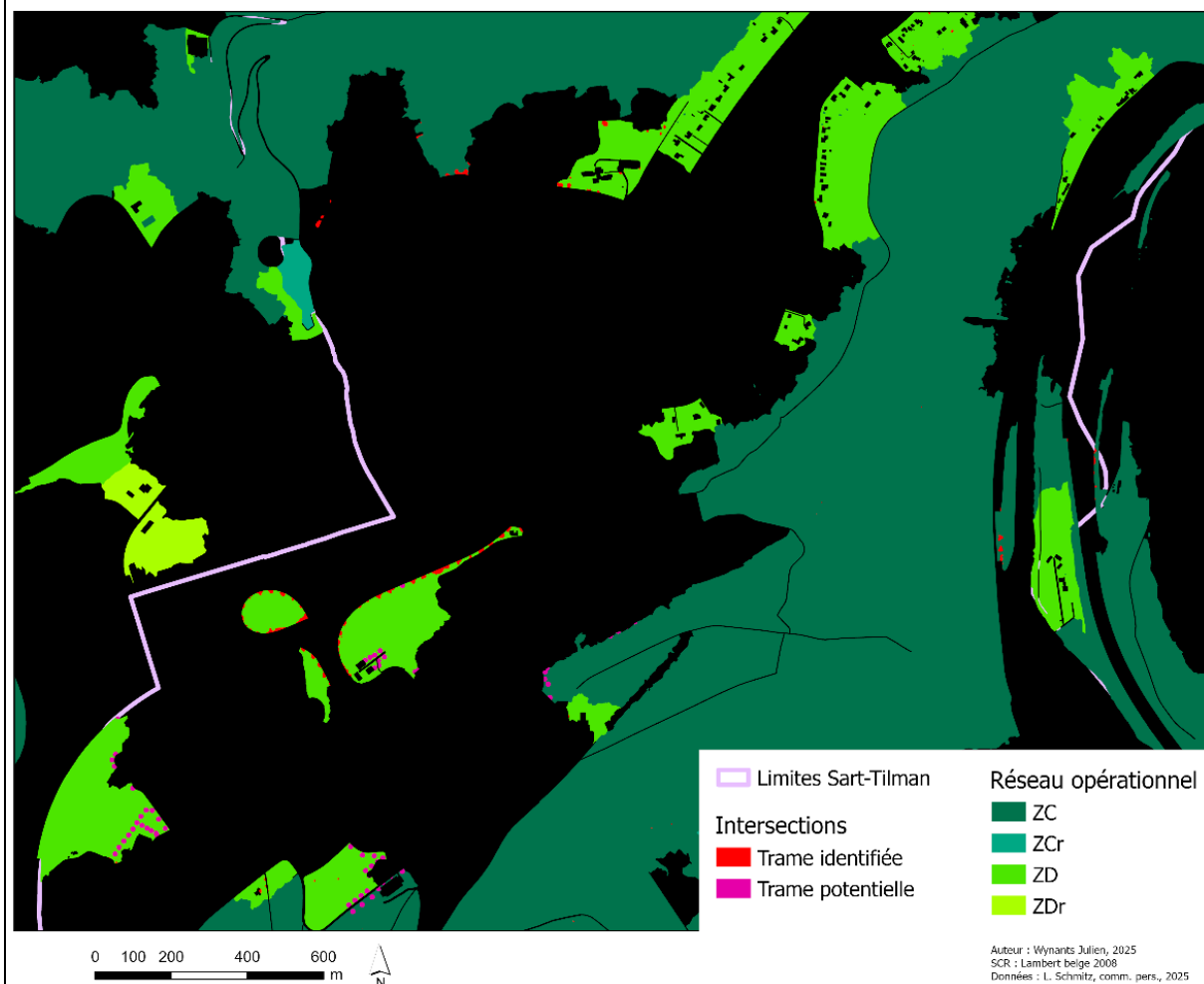


Figure 27 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la sous-trame des forêts feuillues humides. La carte est centrée sur le campus et le Science Park. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

La sous-trame des forêts feuillues mésophiles est plus impactée par la trame lumineuse. Certains sites se confondent avec la sous-trame des forêts feuillues humides comme la boucle de la route du Condroz. Ce site est également considéré comme une zone de développement. Les constats observés sur l'autre sous-trame forestière se vérifient également. La trame lumineuse identifiée intersecte majoritairement des zones de développement en contact avec les routes. La trame lumineuse potentielle impacte plus en profondeur les zones de développement, avec des points lumineux qui fragmentent ces zones. La réserve naturelle agréée du Sart-Tilman est très peu impactée, les seuls points de contact étant proches des bâtiments de physique et du bâtiment trifacultaire. Aucune zone restaurable n'est affectée par la trame lumineuse sur la figure 28.

Du côté de Bonnelles et du versant sud du Sart-Tilman, les zones évoquées dans la sous-trame des forêts mésophiles sont également affectées bien que le statut au sein du réseau opérationnel soit différent. Dans le cadran sud-ouest de la figure en annexe 9, la zone de développement aux abords du club de golf du Sart-Tilman contient les valeurs les plus élevées de luminosité observées en forêt, comme évoqué dans la section 7.1. Les zones de développement aux abords des infrastructures sportives du Blanc Gravier sont fortement impactées par la trame lumineuse potentielle.

Au sein du tampon de 1 km autour du site, les intersections entre la trame identifiée et le réseau opérationnel suivent une logique similaire. Les zones de conflits se situent autour de la E25 et dans le Science Park. La rue d'Ougrée est également un site important car la route éclairée isole une ZD coincée entre Kinkempois et la route, du bois de Saint-Laurent.

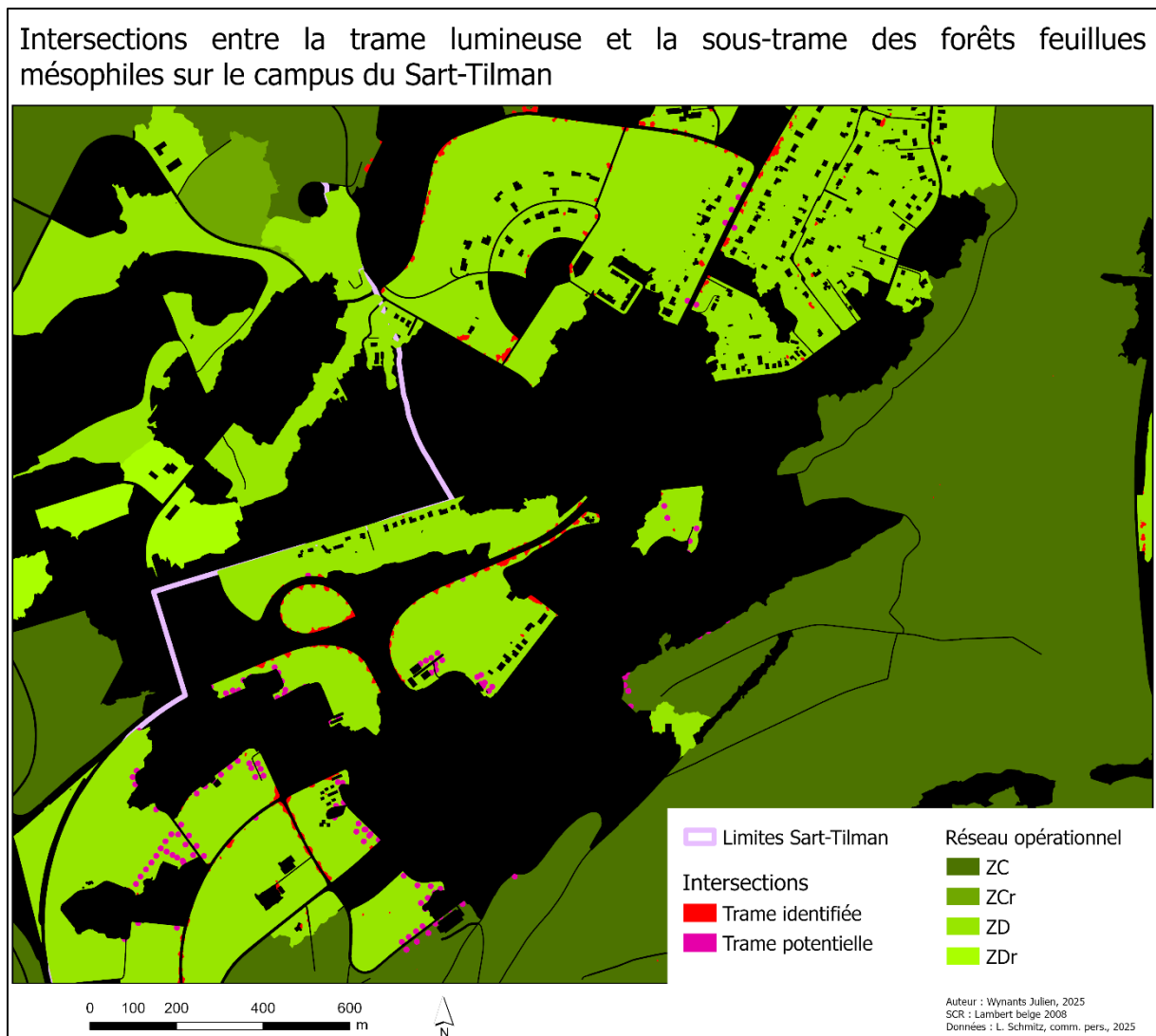


Figure 28 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la sous-trame des forêts feuillues mésophiles. La carte est centrée sur le campus et le Science Park. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

La trame des lisières occupe peu d'espaces sur le site mais est néanmoins impactée par la trame lumineuse. Dans le cadran nord-ouest de la figure 29, les zones en contact avec la route du Condroz se superposent grandement avec la trame lumineuse. Deux ZDr sont presque entièrement entourées par la trame lumineuse identifiée et les ZCr sont également impactées mais dans une moindre mesure. La rue des Hômes, en direction des résidences universitaires, est marquée par la présence d'éclairages. La zone centrale proche du moulin de Colonster, à l'est sur la figure 29, est également touchée par la présence d'éclairages. Les autres sites du réseau opérationnel ne sont pas impactés.

Aucune intersection n'est observée en dehors des limites du site d'étude également.

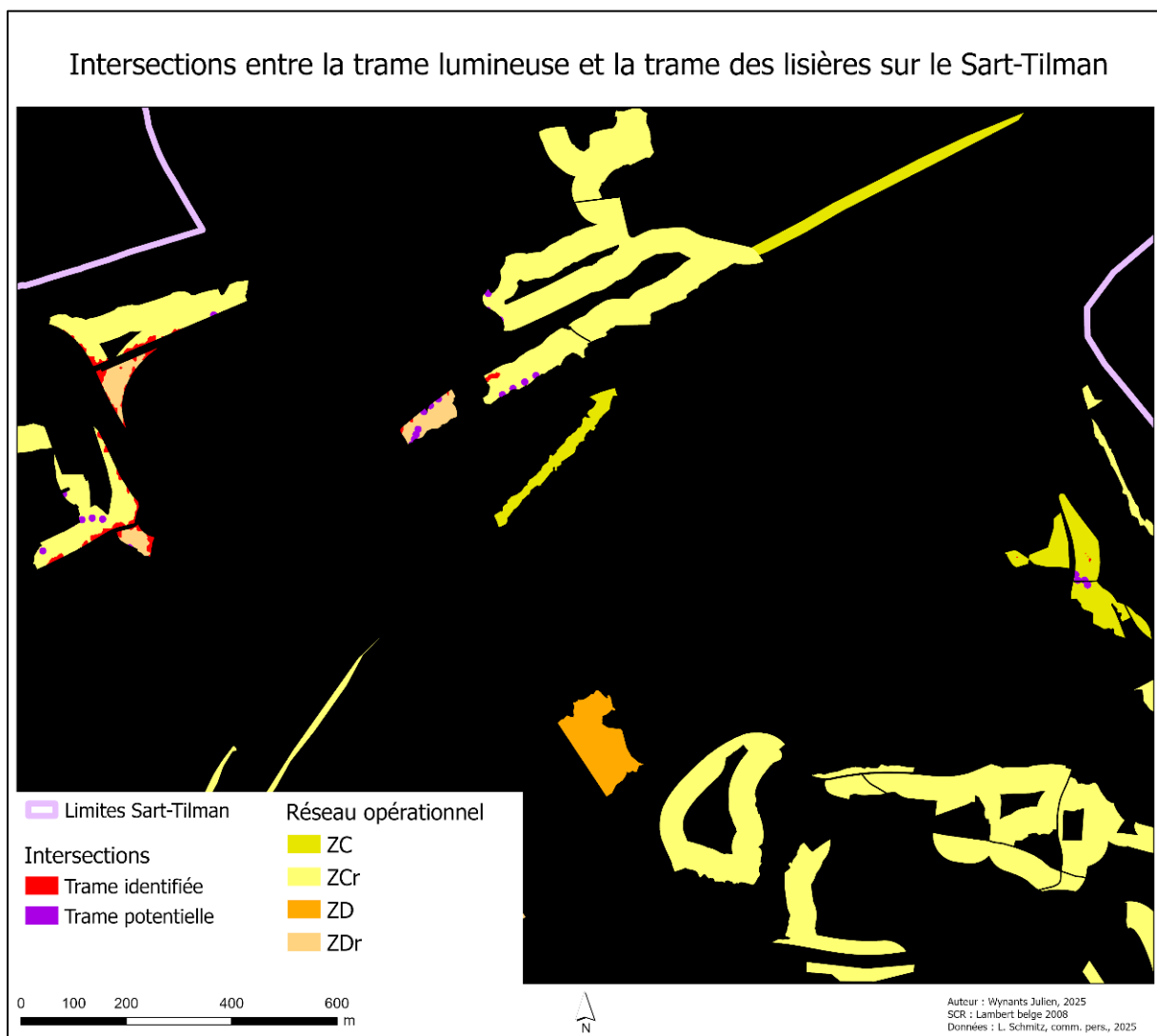


Figure 29 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des lisières. La carte est centrée sur la RNA avec le campus à l'ouest. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

La trame des milieux ouverts secs est centrée autour de la Lande de Streupas. Aucune zone centrale au sein des limites du Sart-Tilman n'est atteinte par la trame lumineuse. De plus, seule la trame identifiée intersecte le réseau opérationnel associé à la trame des milieux ouverts secs. Les zones de développement affectées sont situées à proximité directe de la rue de Tilff, en contrebas du plateau du Sart-Tilman. Les résultats des intersections sont présentés dans la figure 30.

Au nord du site d'étude, entre Kinkempois et Angleur, d'importantes zones de développement présentant des contacts avec la trame lumineuse identifiée sont observables sur la figure 31. Les intersections sont localisées au sein même des ZD, ce qui accentue les impacts de la lumière sur la biodiversité. Cette localisation s'explique par le fait que ces sites de milieux ouverts secs sont situés sur le réseau ferroviaire, à l'inverse du réseau routier qui délimite généralement les sites.

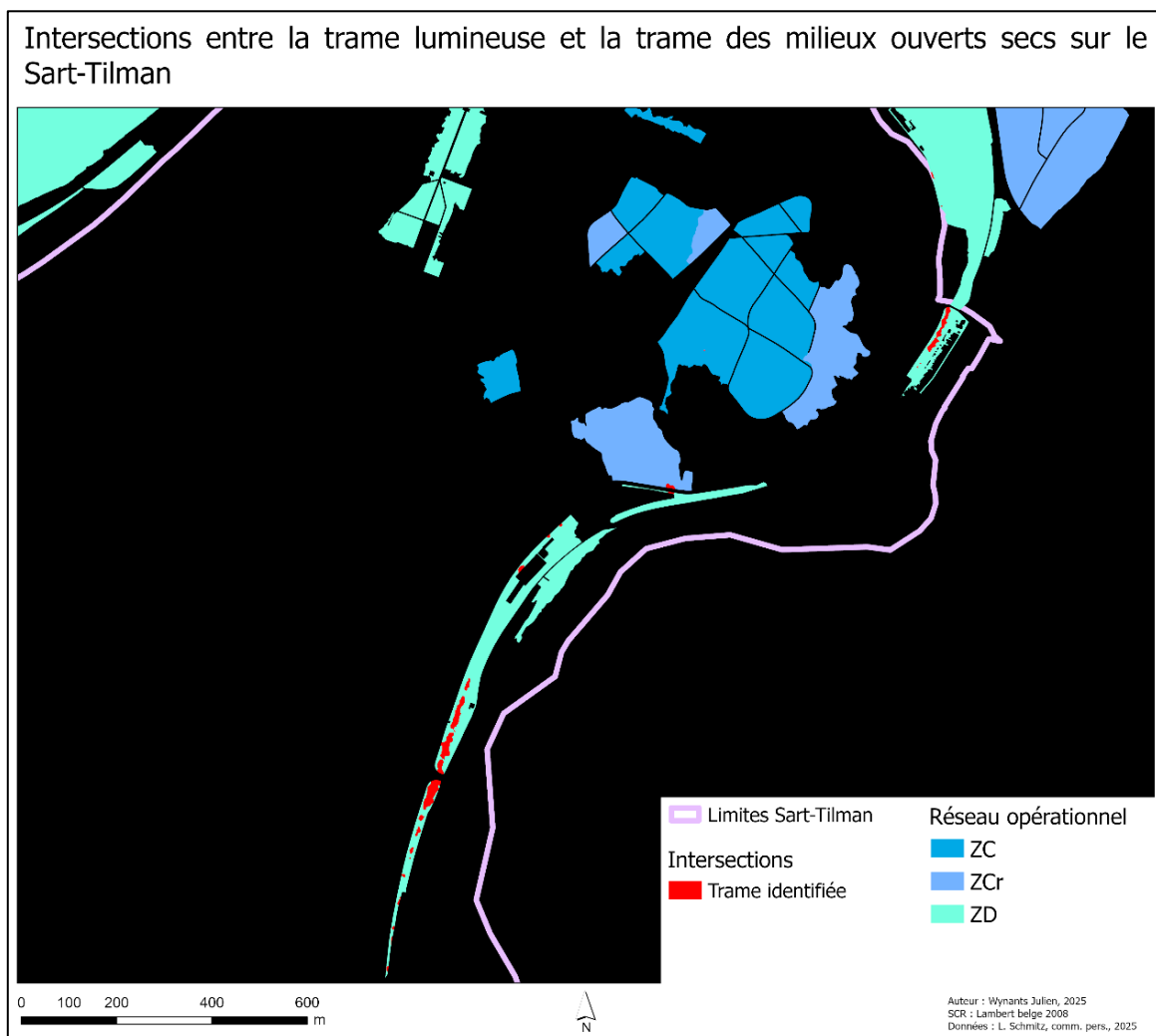


Figure 30 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des milieux ouverts secs. La carte est centrée sur la Lande de Streupas et les abords de la rue de Tilff. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Intersections entre la trame lumineuse identifiée et la trame des milieux ouverts secs à proximité du site d'étude

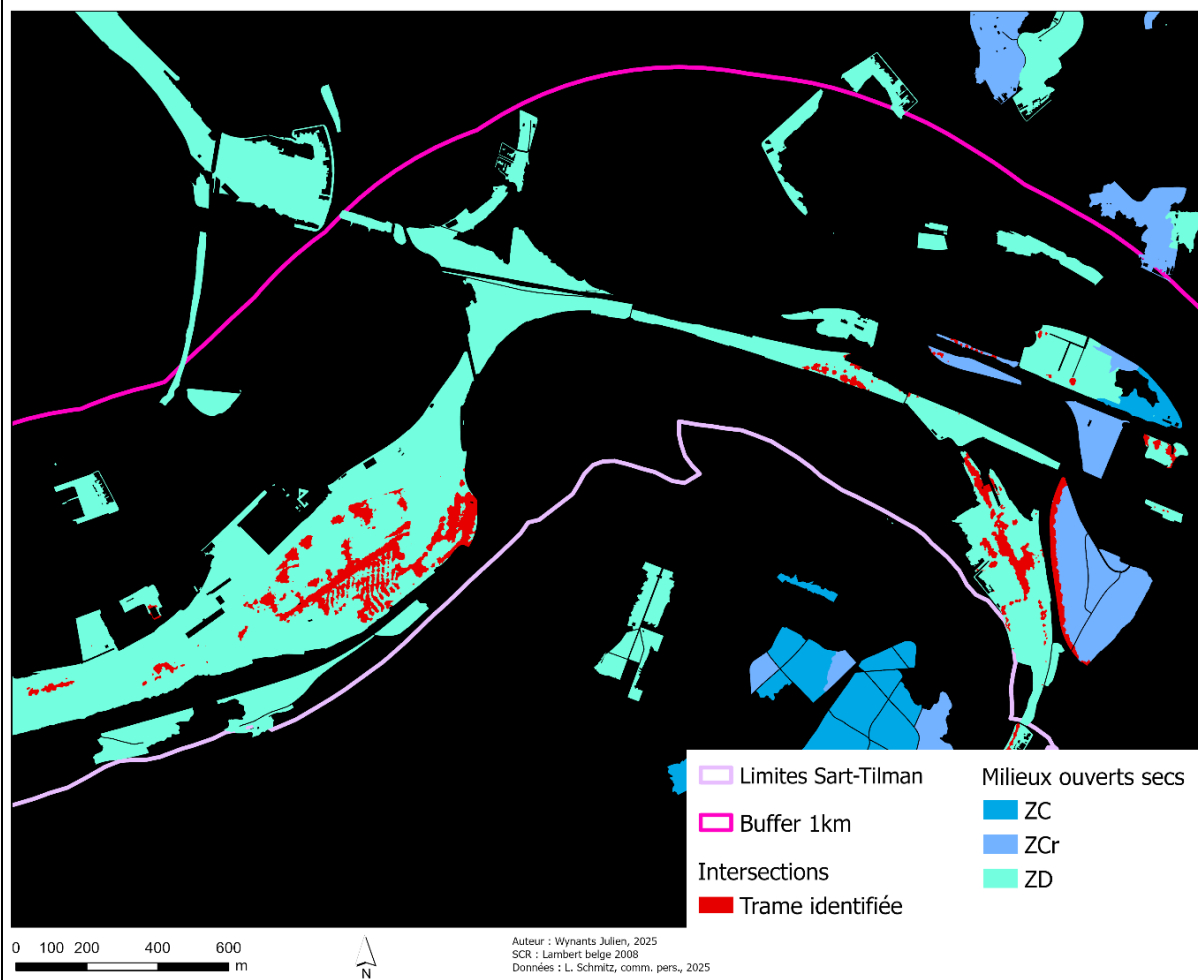


Figure 31 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des milieux ouverts secs. La carte est centrée sur l'atelier de Kinkempois et Angleur. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Enfin, la trame des prairies est la trame la plus intégrée au sein même du campus. De nombreuses zones du réseau opérationnel sont affectées comme le démontre la figure 32. Les zones autour du rond-point Simone David Constant et du réseau routier sont touchées par la trame lumineuse identifiée. L'impact est majeur car les zones sont de formes rectilignes et irrégulières, ce qui augmente les zones de contact. Les zones de développement restaurables autour des résidences universitaires ainsi qu'au sein des zones piétonnes du campus sont affectées par la trame lumineuse potentielle. Le constat est identique pour les zones de développement intégrées sur le campus. Le versant sud du Sart-Tilman est disponible dans les annexes 10. Seules les zones de développement sont touchées par la trame lumineuse.

Les ZD proches des parkings du Blanc Gravier sont grandement impactées par la trame potentielle. La trame identifiée intersecte les ZDr proches du rond-point Marcel Florkin et au sud du CHU, site déjà cité pour les sous-frames des forêts feuillues.

En dehors des limites du site d'étude, aucune intersection n'a été relevée.

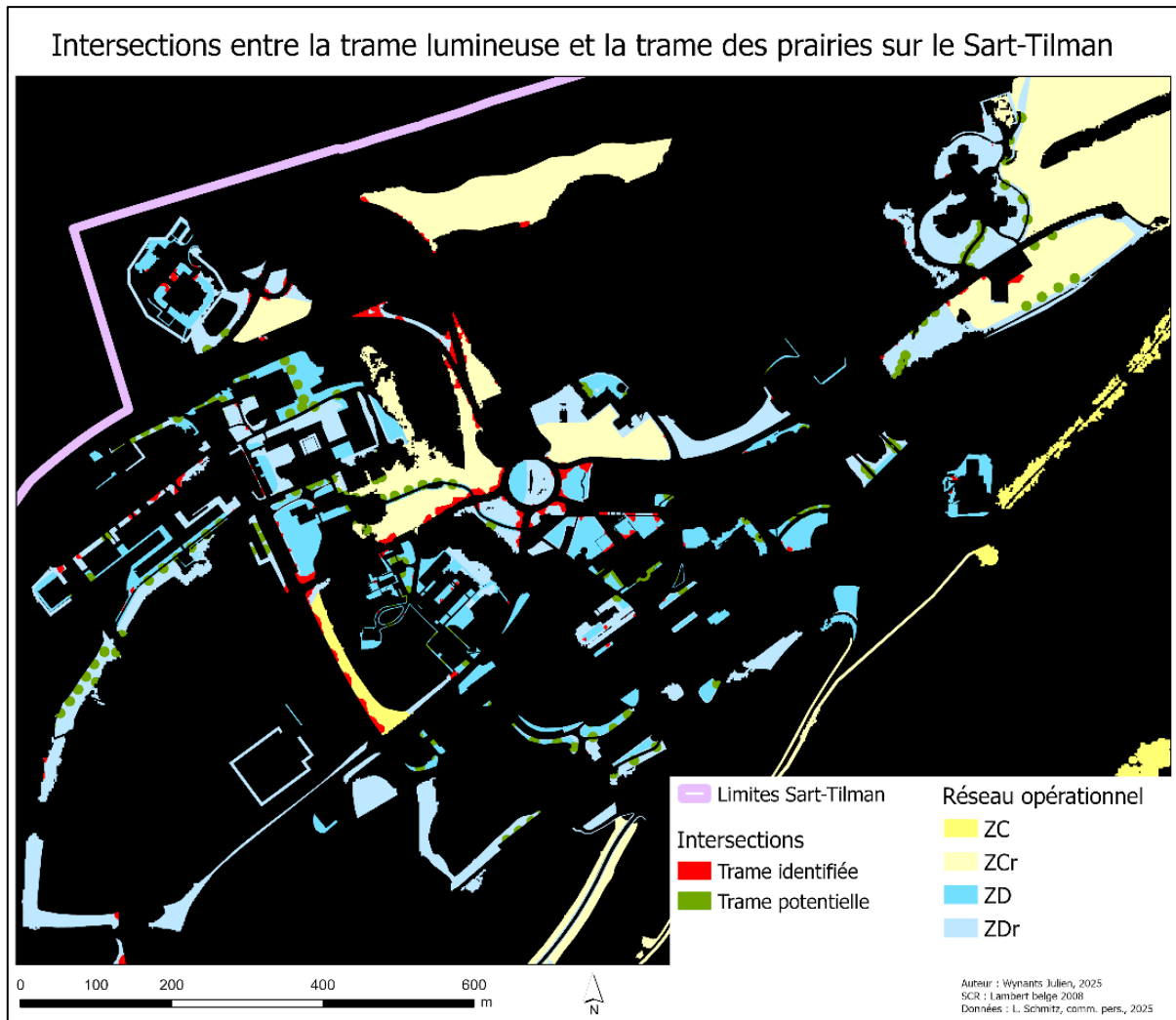


Figure 32 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des prairies. La carte est centrée sur le campus du Sart-Tilman. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

7.2.2. Intersections entre les corridors écologiques et la trame lumineuse

Les intersections entre la trame lumineuse et les corridors écologiques existants présentent des impacts différents en fonction des trames. En effet, pour la sous-trame feuillue humide, les contacts se situent sur des corridors de classes 1 et 2 sur une échelle de 1 à 5. Gillet *et al.* (2024) ont classé les corridors écologiques en cinq classes en fonction de l'indice

de *Betweenness centrality* qui traduit l'importance d'un corridor au sein du réseau, c'est-à-dire sa centralité. Sur cette échelle, plus la valeur est élevée et plus le site est considéré comme central et important. Seuls certains corridors parmi les moins centraux sont touchés et ce, de façon relativement faible. Un corridor d'ordre 1 est grandement impacté à proximité directe du complexe vétérinaire et un corridor d'ordre 5 est menacé au niveau des infrastructures sportives du Blanc Gravier. Néanmoins, les intersections ne semblent pas nuire à la connectivité globale de la sous-trame, ce qui est très positif étant donné la connectivité relativement faible.

Le constat est différent pour la sous-trame mésophile. Au niveau du campus, de nombreux corridors sont touchés. Les corridors traversent le campus et sont fragmentés par la trame lumineuse. Par exemple, sur la figure 33, une partie du quartier de l'Agora et des parkings sont grandement morcelés, surtout au niveau du B4. De plus, cette connexion est importante au vu de sa centralité, évaluée entre 3 et 4. Le rond-point Simone David Constant est également impacté ainsi que le quartier Polytech et une partie du Science Park, bien que ces connexions soient d'une importance légèrement inférieure. Du côté du CHU, certains corridors sont également atteints ainsi que dans le complexe vétérinaire. Deux corridors de niveau 5 sont touchés, situés sur le club de golf du Sart-Tilman et proche du centre sportif du Blanc Gravier. L'éclairage potentiel traverse de part et d'autre le corridor et les observations sont présentées dans l'annexe 11. En résumé, les corridors écologiques de la sous-trame forestière mésophile sont bien plus atteints par la trame lumineuse que ceux de la sous-trame forestière humide. Cela s'explique par la connectivité plus élevée des zones du réseau mésophile qui est définie par la capacité de déplacement du lucane cerf-volant ainsi que par la proximité de zones d'habitats.

Aucune intersection n'a été observée entre la trame lumineuse et les corridors de la trame des milieux ouverts secs qu'ils soient existants ou restaurables.

Les corridors restaurables de la sous-trame des forêts humides sont importants au vu de la faible connectivité du réseau. Néanmoins, des corridors passent à travers le campus autour du rond-point Simone David Constant et de la route du Condroz et sont touchés par la trame lumineuse.

Le versant sud du Sart-Tilman présente peu de corridors restaurables mais aucun n'est touché. Les seuls corridors de classe 5 de betweenness centrality exposés à la trame lumineuse sont à proximité de Kinkempois, en contrebas de la côte du Sart-Tilman. À l'inverse, la sous-trame forestière mésophile ne présente pas de corridors restaurables au sein du site d'étude mais quelques-uns dans un rayon de un kilomètre autour. Ces corridors sont tous atteints mais uniquement en extrémité, ce qui ne semble pas être suffisant pour être réellement impactant.

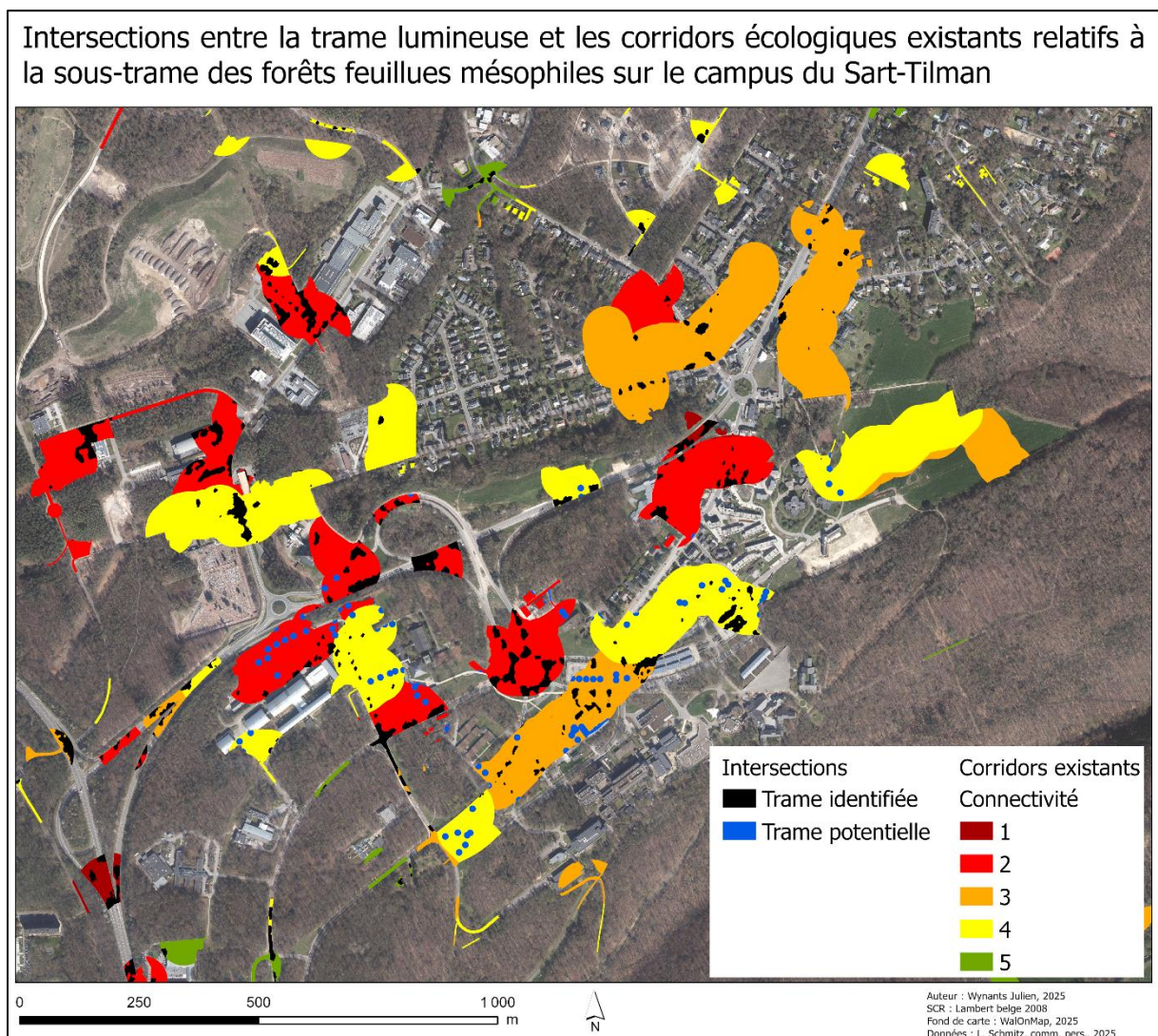


Figure 33 : Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et les corridors écologiques existants relatifs à la sous-trame des forêts feuillues mésophiles. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

7.2.3. Intersections entre le réseau écologique et les tampons définis pour les chauves-souris

Les intersections entre les tampons de cinquante et vingt-cinq mètres autour des points lumineux et les sites d'enregistrements des chauves-souris identifient deux sites touchés. Ces deux sites sont proches de la route du Condroz et ont récolté relativement peu d'enregistrements, ce qui peut être en lien avec cette proximité.

Pour ce qui est des intersections, elles sont sans surprises plus nombreuses et de plus grandes superficies. Seule la trame des milieux ouverts secs conserve des résultats similaires aux observations réalisées ci-dessus. Aucun corridor de cette trame n'est impacté.

La sous-trame des forêts feuillues mésophiles présente des intersections le long de la route du Condroz ainsi qu'au sein du campus et à proximité du CHU et du Blanc Gravier. Ces intersections représentent 11 % de la surface totale de la sous-trame au sein du site d'étude. La majorité des zones impactées sont des zones de développement, situées au contact de sites d'activités humaines tels que le campus ou les résidences le long de la côte du Sart-Tilman. Toutefois, les zones centrales et des ZCr sont également impactées comme présentés au sein de la figure 34.

Sur le campus, des sites entiers sont intégrés au sein des tampons lumineux comme ceux au contact avec la route du Condroz alors que, pour d'autres sites, seul le cœur n'est pas représenté. Néanmoins, leur surface étant réduite, il est possible que ces sites ne présentent plus les conditions nécessaires pour être considérés comme des zones du réseau écologique. Cela impacte également la connectivité de la sous-trame car de nombreux corridors sont présents au sein du campus et proches du CHU. La majorité des corridors touchés sont d'importance 2 et 4, ce qui indique un impact à ne pas négliger pour les forêts mésophiles. Aucun corridor restaurable n'est impacté. Les surfaces de corridors impactées sont présentés dans la figure 35.

Zones de conflits potentiel entre la sous-trame des forêts feuillues mésophiles et les tampons lumineux pour les chauves-souris sur le Sart-Tilman

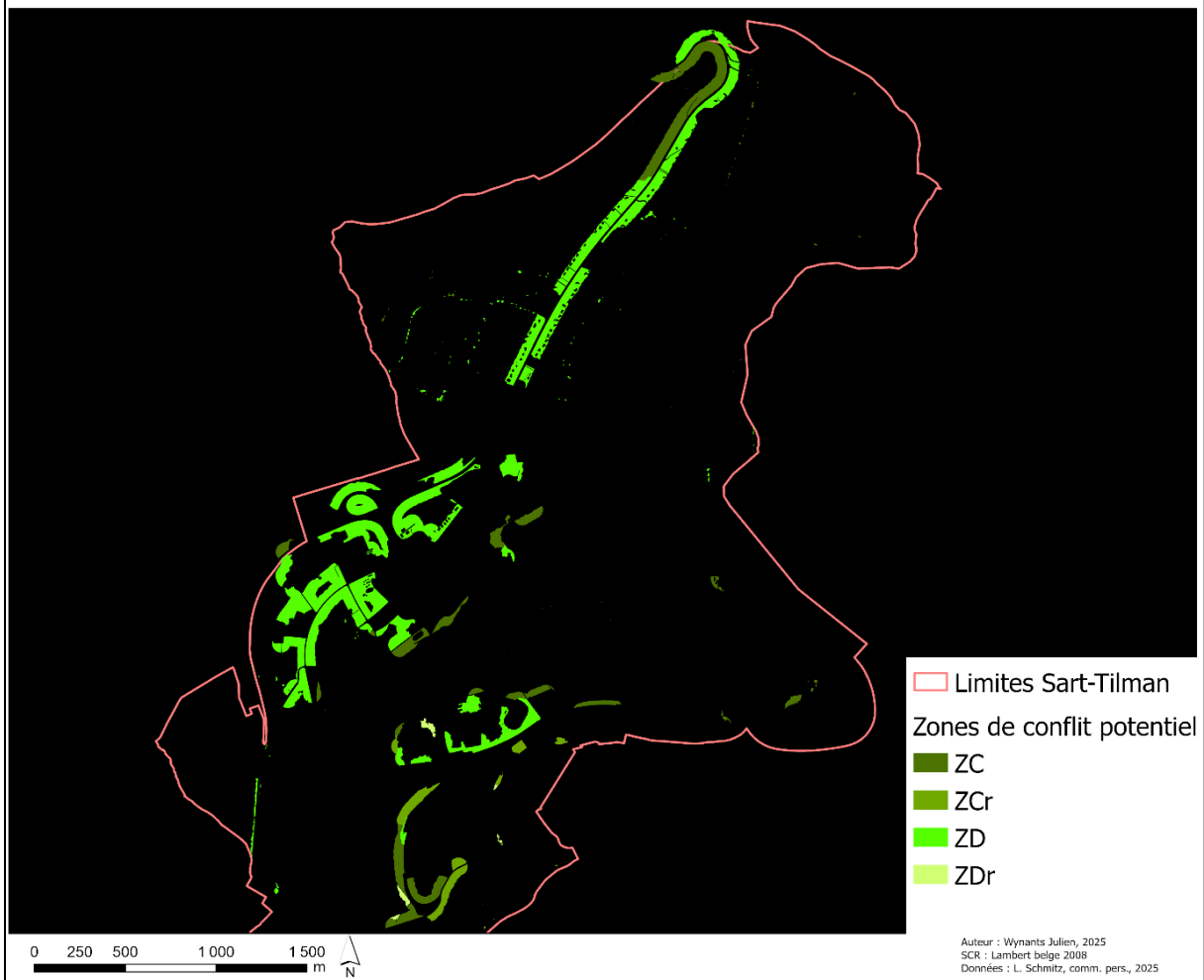


Figure 34 : Zones de conflit potentiel entre la sous-trame des forêts feuillues mésophiles et les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam et al. (2018). Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Zones de conflits potentiel entre les corridors de la sous-trame des forêts feuillues mésophiles et les tampons lumineux pour les chauves-souris sur le Sart-Tilman

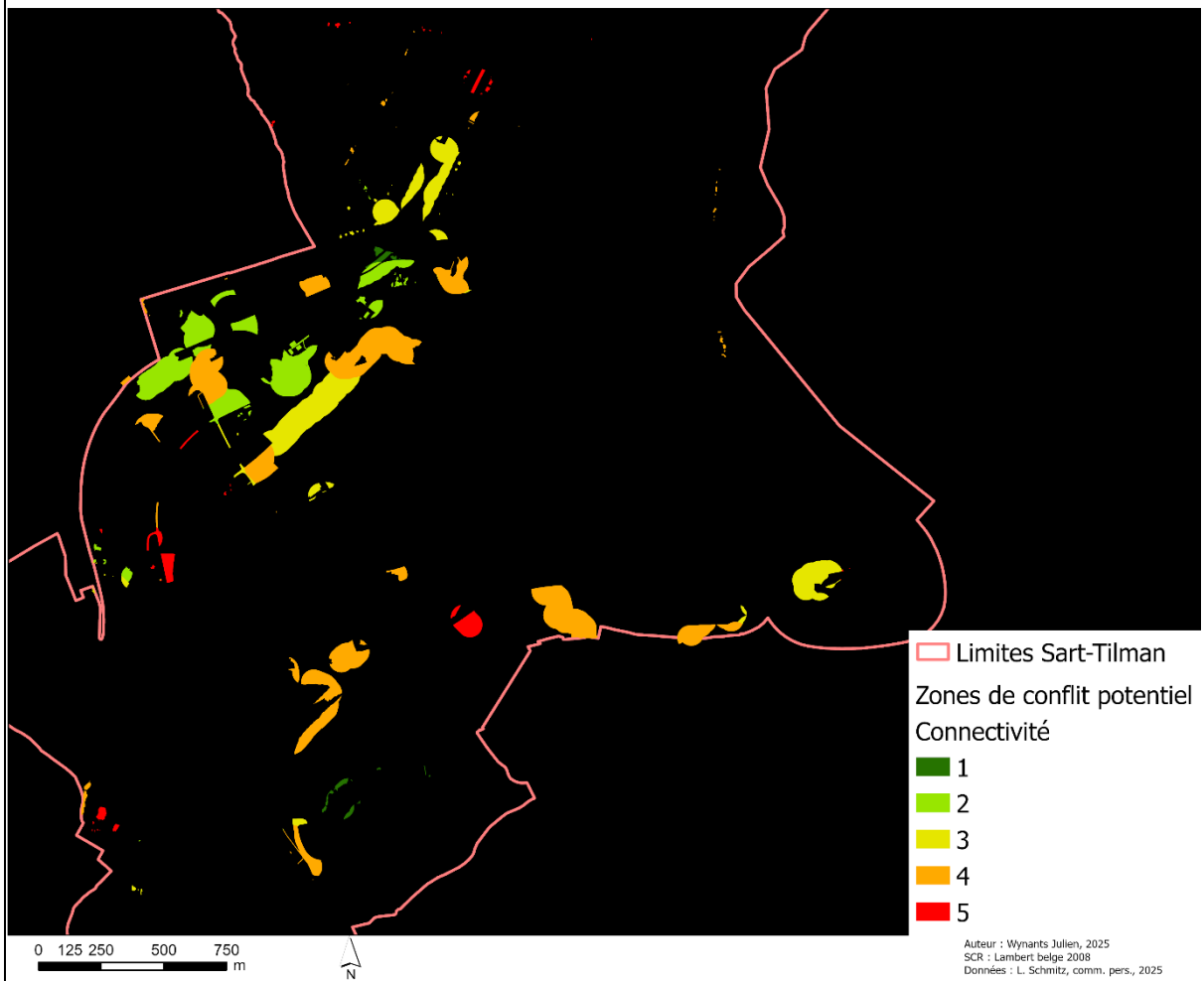


Figure 35 : Zones de conflit potentiel entre les corridors de la sous-trame des forêts feuillues mésophiles et les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam et al. (2018). Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Pour la seconde sous-trame forestière, les surfaces en contact avec les tampons lumineux représentent 6 % de la surface totale au sein du site d'étude. Les sites touchés sont des zones partagées avec la sous-trame mésophile et les constats sont similaires. Les résultats sont présentés dans l'annexe 12.

Les corridors de la sous-trame des forêts humides impactés correspondent à ceux déjà observés dans la section 7.2.2.

Les lisières sont également touchées, principalement sur le campus et près du Château de Colonster. Pour cette trame, 19 % de la surface est touchée dont une majorité de ZC et ZCr. Des zones de développement restaurables sont aussi touchées.

L'impact est élevé sur cette trame dont les zones forment des noyaux dispersés sur le site. Les zones de conflit sont présentées à la figure 36

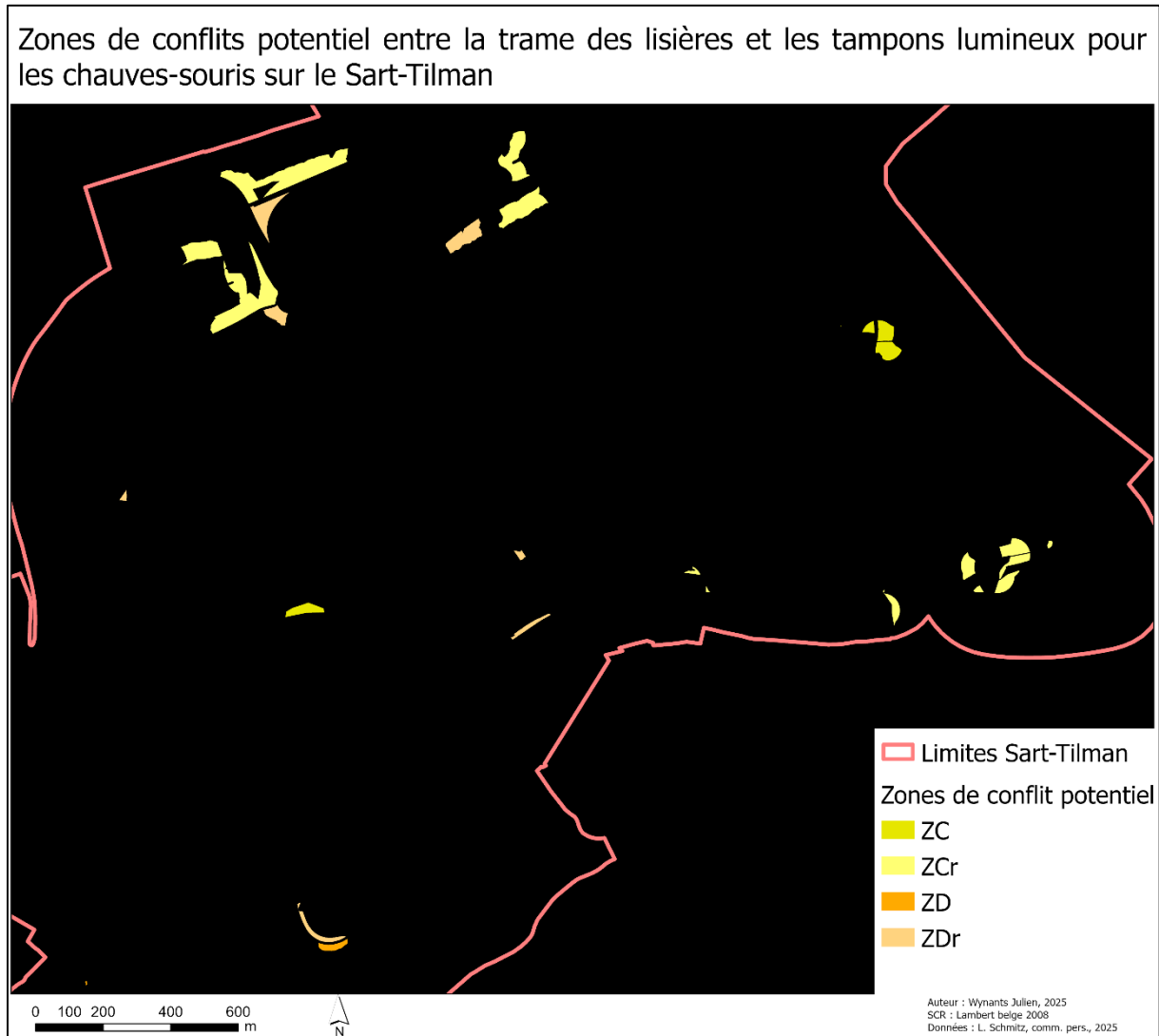


Figure 36 : Zones de conflit potentiel entre la trame des lisières et les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam et al. (2018). Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Enfin, la trame des prairies est la trame la plus touchée par les tampons lumineux avec 23 % de sa surface impactée. Le campus concentre la majorité des intersections où toutes les zones présentes sont touchées. Les prairies proches des homes étudiants ainsi que le versant sud du Sart-Tilman sont également représentés. Le boulevard du Rectorat est bien observable dans la figure 37, où les surfaces entre les voies routières sont intégrées à la trame. Le centre vétérinaire et le château de Colonster sont également visibles.

La trame est composée principalement de zones de développement et de ZDr, ce qui explique leur présence prépondérante au sein des intersections.

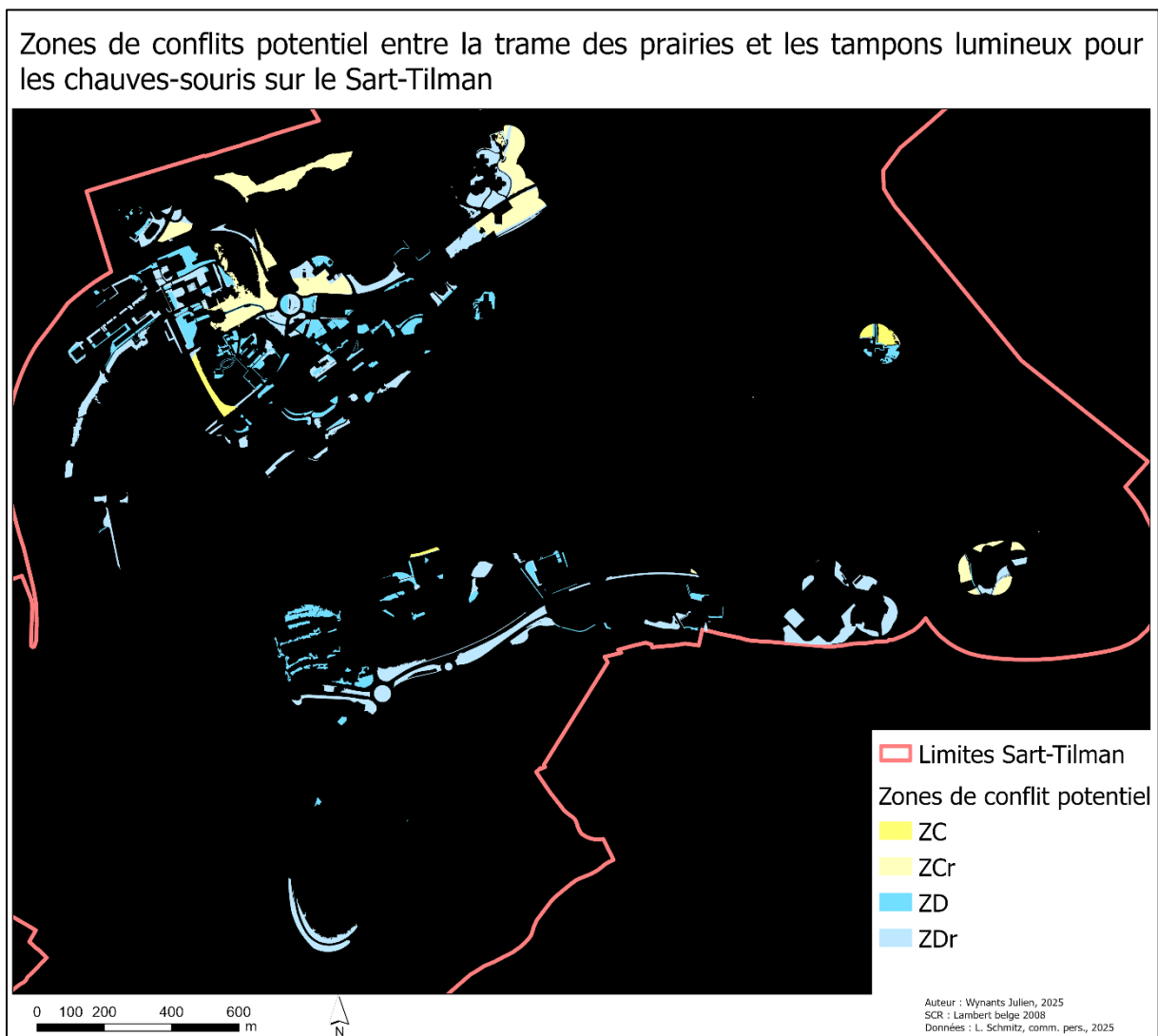


Figure 37 : Zones de conflit potentiel entre la trame des prairies et les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam et al. (2018). Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Discussion

1. L'emprise de la lumière artificielle nocturne sur le Sart-Tilman

L'analyse spatiale des données de luminance a permis de mettre en évidence une distribution hétérogène de la pollution lumineuse sur le site d'étude. Le réseau routier (notamment la E25 et la route du Condroz) structure le paysage nocturne avec plus de 60 % des pixels éclairés concentrés sur les routes principales et communales. Les abords des routes sont également éclairés de façon plus ou moins conséquente en fonction du type d'éclairage. La trame lumineuse globale représente une barrière lumineuse quasi continue, ce qui contribue efficacement à fragmenter les corridors écologiques ainsi que les zones d'habitats. Les zones bâties sont également éclairées. Néanmoins, les photos de terrain ont mis en évidence le fait que les données satellites ne permettent pas d'observer l'entièreté de l'éclairage présent sur le territoire. De plus, la surface éclairée représente 2 % de la surface totale du site. Ce rapport augmente à plus de 3 % en prenant en compte la surface du site tamponnée à un kilomètre supplémentaire. En conséquence, l'emprise spatiale de la lumière artificielle nocturne, bien que limitée en termes de surface absolue, structure fortement le paysage nocturne au vu de la concentration de la surface éclairée.

Quantitativement, les valeurs sont globalement homogènes avec plus de 75 % des pixels éclairés ayant une valeur comprise entre 85 et 140 $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, dont 35 % compris entre 85 et 100 $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$. Néanmoins, les niveaux moyens d'intensité lumineuse par classe d'occupation du sol montrent que malgré des maxima ponctuels élevés localisés, les milieux éclairés sont majoritairement peu lumineux. Les indices de variabilité (écart-type, coefficient de variation et aplatissement) révèlent que les milieux bâtis et certaines routes communales présentent une grande hétérogénéité dans leurs valeurs alors que les routes principales offrent un éclairage plus homogène et soutenu. De plus, la décroissance de la luminance en fonction de la distance à la route principale la plus proche confirme une structure en « lignes de force » autour des axes principaux, avec des pics (600 m, 1100 m) expliqués par l'exclusion des routes communales dans le jeu des données routières.

Cependant, certaines zones du territoire se démarquent par une intensité lumineuse plus élevée que celle attendue au vu de leur contexte socio-économique, ce qui suggère des éclairages surdimensionnés ou mal adaptés à l'usage réel. Le bâti est d'ailleurs la classe d'occupation du sol qui présente la valeur d'intensité lumineuse la plus élevée mais est également plus variable que le réseau routier. À l'inverse, les zones forestières sont relativement sombres avec une majorité d'éclairages observés à proximité des lisières. Les valeurs élevées observées dans les forêts sont très ciblées et dépendantes d'activités humaines, comme c'est le cas au sein du club de golf du Sart-Tilman.

2. Pertinence d'intégrer une trame au sein du réseau écologique

Le territoire du Sart-Tilman est majoritairement forestier et dominé par la sous-trame des forêts feuillues mésophiles qui recouvrent 58 % du site et celle des forêts feuillues humides (41 %). Ces surfaces se superposent majoritairement et offrent des continuités écologiques autour de la RNA du Sart-Tilman qui est considérée comme la tache centrale dans l'organisation des deux sous-trames forestières. Les trames des lisières, des milieux ouverts secs et des prairies sont moins représentées sur le territoire, souvent fragmentées, peu connectées et composées en grande partie de zones restaurables. Ces trames jouent pourtant un rôle complémentaire essentiel à la biodiversité globale du site. De plus, le Sart-Tilman est un nœud essentiel du réseau écologique à l'échelle de la Ville de Liège et de nombreux sites d'intérêts pour la biologie sont recensés sur le site. Dès lors, ajouter la pression potentielle de l'éclairage nocturne semble intéressant.

Néanmoins, les intersections entre la trame lumineuse et les éléments qui composent le réseau écologique semble montrer une pertinence nuancée de l'intégration d'une trame noire au réseau du Sart-Tilman. D'un côté, l'emprise globale de la lumière est relativement limitée en termes de surface, ce qui pourrait laisser penser qu'une trame noire à l'échelle du site n'est pas strictement nécessaire. De l'autre côté, la localisation des impacts révèle des intersections avec des éléments clés du réseau écologique opérationnel, en particulier dans la sous-trame des forêts feuillues mésophiles où des corridors de centralité moyenne et élevée sont fortement touchés. En effet, les corridors traversant le campus, le complexe du Blanc Gravier et les abords du CHU sont touchés par l'éclairage, ce qui réduit la capacité des déplacements de certaines espèces et réduit la connectivité des zones centrales au sein des trames. Pour la sous-trame forestière humide, l'impact semble léger à l'inverse de la sous-trame mésophile. Néanmoins, l'impact de

la pollution lumineuse sur les corridors écologiques est mitigé par le poids du réseau routier lors de leur identification. En effet, lors de la construction du réseau écologique du Sart-Tilman par Gillet *et al.* (2024), le coût de déplacement requis pour qu'une espèce modèle se déplace sur une surface urbanisée ou routière était suffisamment élevé pour que les corridors évitent au maximum les surfaces éclairées.

Pour ce qui est des zones du réseau opérationnel, toutes les trames sont touchées pas l'éclairage nocturne. La trame forestière feuillue est composée de larges surfaces, ce qui rend l'impact au sein des zones centrales relativement faible. Les zones de développement sont cependant plus touchées, principalement car elles sont situées directement au contact avec les différents quartiers du campus et du CHU. Des zones de développement peuvent même être entièrement entourée par de la lumière artificielle, ce qui isole grandement le site durant la nuit. Pour les trames dont les zones centrales et de développement recouvrent des surfaces moins étendues, l'impact de l'éclairage est plus marqué. La trame des lisières est composée de zones longilignes traversées par la trame lumineuse qui fragmente majoritairement les ZCr et ZDr. Pour la trame des milieux ouverts secs, les intersections sont localisées sur les zones de développement. Enfin la trame des lisières est particulièrement impactée car de nombreuses zones sont insérées au sein du campus et autour des routes principales. Ces localisations correspondent dès lors aux endroits les plus touchés par l'éclairage nocturne. Malgré les impacts, les zones centrales sont relativement peu touchées.

La présence de sites avec un statut de protection comme la RNA et les sites Natura 2000 semblent avoir permis de réduire l'emprise potentielle de la lumière artificielle. En effet, une portion des boulevards de Colonster et du Rectorat qui relie les deux versants du Sart-Tilman ne sont pas éclairés au contact avec la RNA.

De plus, les espèces modèles des sous-trames des forêts feuillues sont nocturnes ou crépusculaires. La pollution lumineuse est donc un élément pertinent à intégrer dans la conception du réseau fonctionnel. L'inventaire des chiroptères, réalisé entre mars et septembre 2023 sur 56 points, a permis d'identifier 17 espèces, dont plus de 80 % de pipistrelles. La majorité des espèces identifiées sont liées aux forêts comme le murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*) ou la barbastelle (*Barbastella barbastellus*). D'autres profitent des lisières en tant qu'écotone pour la chasse. Les chiroptères sont très sensibles à la pollution lumineuse et subissent des perturbations comportementales, renforçant la nécessité de limiter l'éclairage dans et autour des habitats prioritaires. De plus, selon Azam *et al.* (2016), la lumière artificielle nocturne a un impact négatif supérieur aux surfaces imperméables dans leur capacité de

déplacement. Dès lors, bien qu'à une échelle locale les points lumineux présentent des opportunités pour la chasse, ces mêmes points exercent une influence négative sur les activités des chauves-souris à l'échelle du paysage. Les intersections entre des tampons de cinquante mètres autour des points lumineux et les différentes trames ont également mis en avant d'importantes surfaces proches sensibles à l'éclairage selon les observations de Azam *et al.* (2018). Pour chaque trame, des zones centrales sont touchées ce qui démontrent l'importance de la prise en compte de l'éclairage dans la conception des trames. De plus, certaines zones (centrales et de développements) sont fortement intégrées au sein de ces tampons, réduisant ainsi les surfaces disponibles pour les chauves-souris.

Par conséquent, une trame noire apparaît pertinente pour préserver la continuité écologique des trames du réseau écologique.

3. Réponses aux hypothèses

Ces éléments permettent de répondre aux hypothèses formulées en amont.

Première hypothèse : « *Le site n'est pas suffisamment impacté par la pollution lumineuse pour que la mise en place d'une trame noire soit pertinente* ». Cette hypothèse est partiellement infirmée. Bien que d'un point de vue quantitatif, l'emprise de l'éclairage nocturne est faible, de nombreux auteurs ont mis en évidence les perturbations de l'ALAN sur la biodiversité (Longcore & Rich, 2004 ; Gaston *et al.*, 2013 ; Aulsebrook *et al.*, 2018 ; Azam *et al.*, 2019 ; Falcón *et al.*, 2020). La distribution spatiale de l'éclairage nocturne et ses intersections avec des corridors clés rendent la mise en place d'actions ciblées pertinente pour préserver la continuité écologique. De plus, lors des calculs de chemins de moindre coût pour définir les corridors, les zones éclairées peuvent être associées à un coût de déplacement comme n'importe quelle occupation du sol. Le coût peut également être adapté à l'intensité lumineuse afin d'offrir un outil modulable. Dès lors, la mise en place d'une trame noire est un moyen d'intégrer la dimension temporelle des processus écologiques dans la mise en place d'un ensemble connecté de réservoirs et de corridors.

Deuxième hypothèse « *La pollution est localisée et impacte les corridors* ». Cette hypothèse est retenue. En effet, la pollution lumineuse est majoritairement localisée le long d'infrastructures routières et elle affecte des corridors, en particulier ceux de la sous-trame mésophile. De plus, les corridors localisés au sein du campus et des quartiers du Blanc Gravier,

du CHU sont impactés, fragmentant certaines connexions de centralité moyenne ou élevée. Dès lors, comme mentionné ci-dessus, la pollution lumineuse doit être intégrée dans la conception du réseau écologique.

Troisième hypothèse « *La pollution lumineuse observée n'impacte pas le réseau écologique opérationnel du Sart-Tilman et ne nécessite pas d'aménagements* ». Cette hypothèse est infirmée. En effet, plusieurs éléments du réseau opérationnel subissent des impacts localisés susceptibles d'altérer la perméabilité et les déplacements d'espèces, ce qui justifie des aménagements ciblés. Néanmoins, la RNA du Sart-Tilman, qui représente la zone centrale de la trame forestière, est peu impactée.

4. Les enjeux du territoire

Le site du Sart-Tilman associe de nombreuses facettes. L'analyse croisée entre la trame lumineuse et les composantes du réseau écologique du Sart-Tilman met en évidence plusieurs hotspots où l'éclairage artificiel interfère directement avec les trames écologiques identifiées. Trois zones principales concentrent l'essentiel des intersections : le campus du Sart-Tilman, le site hospitalier du CHU et le complexe sportif et d'activités du Blanc Gravier. Ces zones se distinguent par leur densité de sources lumineuses, leur maintien d'un éclairage tardif et leur proximité avec des habitats de grand intérêt pour la biodiversité.

Le campus concentre la plus forte densité d'intersections entre l'éclairage et le réseau écologique. De plus, les relevés montrent que l'éclairage y est maintenu après 23h au sein du quartier Agora alors que l'activité humaine devient marginale. Les zones centrales des forêts feuillues de la RNA sont à proximité directe et l'éclairage génère un effet de bord. Les corridors de la sous-trame mésophiles sont en revanche fortement impactés. Des zones centrales restaurables de la trame des lisières sont également touchées. Néanmoins, ce sont les zones de développement des trames forestières et l'ensemble de la trame des prairies qui sont le plus impactés par l'éclairage direct.

Dans le contexte nocturne, l'enjeu sur le campus semble de préserver les zones sombres structurelles et d'éviter de nouveaux flux. L'éclairage routier n'est pas de la responsabilité directe de l'Université mais l'éclairage au sein des différents quartiers peut être modifié. Des extinctions peuvent être mise en place ou un abaissement des intensités. Les photos nocturnes

ont montré un éclairage peu impactant à proximité du B4 qui n'est pas reproduit dans le reste du campus.

Le CHU présente également une forte présence d'éclairage, justifiée par une activité nocturne légitime. Les intersections avec le réseau écologique sont mais nombreuses bien qu'elles concernent des zones centrales. Afin de réduire l'impact de l'éclairage sur les espaces naturels alentours, la température de l'éclairage peut être réduite ou un éclairage plus directionnel peut être mis en place.

Enfin, le Blanc Gravier combine des voiries, des zones de stationnement, des activités sportives et universitaires. Cela génère un éclairage régulier, notamment en soirée. Les interactions avec les différentes trames du réseau écologiques sont diffuses et affectent principalement les zones de développement restaurables. Une extinction programmée après la fin des événements peut toutefois être mis en place.

Dès lors, une hiérarchisation générale peut être développée. Le campus représente la priorité principale en raison de sa forte densité de points lumineux et de ses impacts directs sur des zones centrales et de développement. Le Blanc Gravier est la seconde priorité car bien que les impacts soient plus ponctuels, les activités sont compatibles avec des actions de préservation et de restauration du paysage nocturne. Le CHU est le site le moins prioritaire car ses activités requièrent un éclairage constant qui ne peut être réduit sans plus de recherches. Des mesures sur les routes principales et communales telles que des occultations, des réductions d'intensité, l'orientation des luminaires ou la baisse de température de couleur sont également à prioriser.

5. La méthodologie

Ce travail a pour objectif de mettre en place une méthode permettant d'identifier la pollution lumineuse sur le site. Une fois l'emprise de la pollution identifiée, les différentes analyses ont permis de valider la mise en place d'une trame noire sur le Sart-Tilman. Outre la recherche bibliographique sur les thèmes des réseaux écologiques, des trames noires, de la télédétection nocturne et les impacts de la pollution lumineuse, la méthodologie appliquée peut se résumer en quatre étapes distinctes.

Tout d'abord, le travail a débuté sans savoir comment évaluer la pollution lumineuse. Plusieurs options étaient possibles comme acheter une image satellitaire nocturne ou trouver des données

gratuites disponibles. Des photos prises par drones étaient aussi concevables, tout comme des mesures au sol puis une estimation à l'aide des points lumineux présents sur le site.

Par chance, des images satellites nous sont parvenues après une rencontre au cours d'un stage professionnel (T. Kervyn, comm. pers., 2025). Une fois ces images obtenues, la méthodologie s'est précisée. De plus, le Sart-Tilman s'est doté d'un réseau écologique depuis 2024 ce qui a permis d'évaluer directement l'impact sur les trames déjà définies du réseau écologique. Bien que l'image satellite date de 2020, les deux données ont été comparées car l'image satellite est postérieure aux travaux sur l'éclairage public sur le site. Un inventaire des espèces de chiroptères présentes sur le site ainsi que la localisation des points lumineux et des photos nocturnes prises au sol viennent compléter les données spécifiques au territoire.

Ensuite, la phase deux correspond au diagnostic du territoire. Quelle est la portion du territoire touchée par la pollution lumineuse et à quel point la pollution lumineuse impacte la biodiversité ? L'image satellite est traitée sur base des articles de Zheng *et al.* (2018) et Xue *et al.* (2020) afin de discriminer les pixels en deux classes : sombre et éclairé. La valeur de $85 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ est définie comme la valeur seuil pour intégrer la classe « éclairé » car c'est la valeur minimale de luminance obtenue et car les deux articles cités ci-dessus ont effectués un choix similaire. Cela implique que nous considérons tous les pixels éclairés, ce qui est justifié par des seuils de sensibilité définis pour des espèces de chauves-souris présentes sur le site inférieurs à $85 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ (Laforge *et al.*, 2019). Les points lumineux existants non compris dans la trame lumineuse observée par le satellite ont été intégrés dans une trame lumineuse potentielle. Cet ajout permet une vision plus précise de la surface potentiellement impactée par l'éclairage, tout en gardant une nuance entre ce qui est observé ou non. La description de l'emprise de la lumière artificielle nocturne ne s'inspire pas d'études connues mais permet de décrire la répartition de l'éclairage en fonction de l'occupation du sol et de la distance entre la lumière et le réseau routier structurant. Ces observations ont été confirmées par une visite de terrain qui a mis également en avant une des limites de l'imagerie nocturne. En effet, le campus semble plus éclairé que ce qui était observé par image satellite.

Les enjeux de biodiversité du territoire ont été analysés par le biais du réseau écologique du Sart-Tilman qui a permis d'identifier les zones de biodiversité et les corridors écologiques essentiels. L'inventaire des chauves-souris renforce également les enjeux de biodiversité, en intégrant des espèces qui ont été enregistrées au sein de toutes les trames qui composent le réseau écologique.

La troisième phase correspond à l'identification des zones de conflits entre la lumière artificielle et le réseau écologique. Cette étape est essentiellement réalisée sur ArcGis en intersectant les couches de données. Les observations réalisées sur le terrain ont ensuite permis de vérifier les zones conflictuelles. Des intersections ont également été réalisées entre les différentes trames et les points lumineux connus sur le site à l'aide d'un tampon de cinquante mètres autour de chaque point lumineux afin d'observer les zones sensibles aux

Enfin, la phase quatre consiste en une hiérarchisation des enjeux du territoire. Trois sites majeurs sont distingués avec le campus, le Blanc Gravier et le CHU. Le site des infrastructures vétérinaires suit la même logique que celle du campus. Sur base des zones de conflits identifiées, cette phase suggère des aménagements et propose une classification des sites à prioriser pour protéger et conserver efficacement l'environnement nocturne.

Cette stratégie en quatre phases s'inspire partiellement des travaux de Sordello (2017) et Sordello *et al.* (2021) qui proposent une approche basée sur l'identification des zones de conflits. Une approche déductive est également développée en superposant les zones éclairées au réseau écologique déjà existant. La figure 38 résume les différentes phases de la méthodologie appliquée.

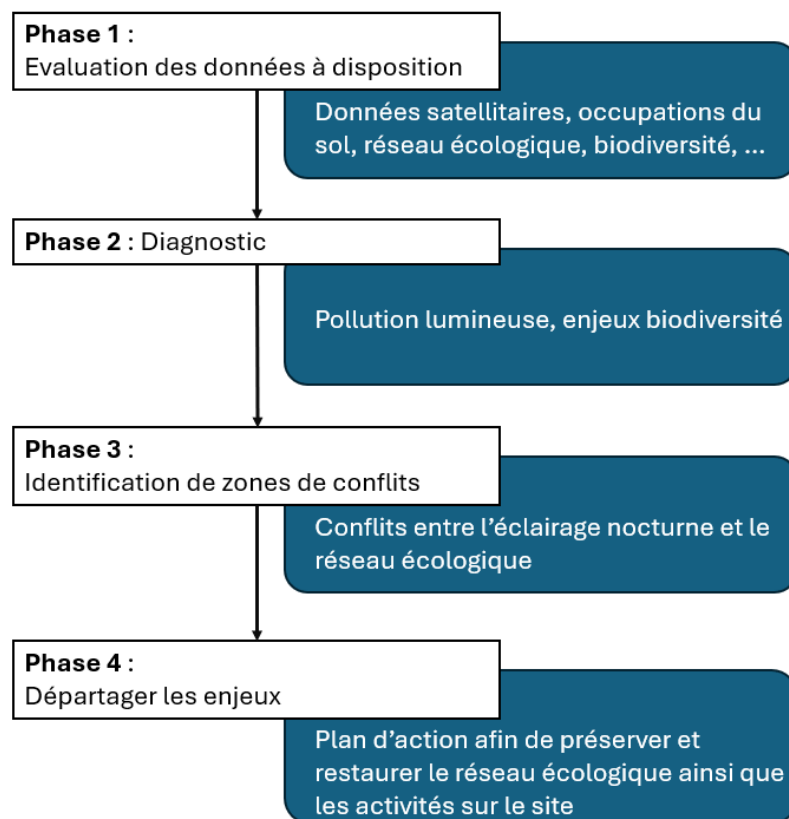


Figure 38 : Représentation schématique du plan de travail séparé en quatre phases distinctes. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.

Néanmoins, les photos aériennes de nuit captent uniquement les lumières émises vers le haut selon un angle de quasiment 90 degrés par rapport au sol. Dès lors, l'ensemble de la lumière artificielle nocturne à laquelle la biodiversité est exposée, n'est pas représentée. En particulier celle perçue par la faune au sol ou en vol voire dans l'eau (Sordello *et al.*, 2021). Toutefois, ces photos permettent de visualiser directement les flux émis vers le haut issus de tout éclairage public comme privé. D'autres limites sont identifiées. Tout d'abord, le SNR relativement faible de la bande verte et de la bande bleue, ce qui réduit partiellement la quantité d'informations captées.

Le fichier contenant les points lumineux n'est pas complet malgré les fusions de différentes sources. De plus, la nature des éclairages n'est pas connue, ce qui aurait pu permettre une différenciation plus fine des enjeux liés à l'éclairage nocturne. Le décalage entre les différentes couches de données est également à noter. Bien que l'impact semble relativement faible, les données ont été produites sur un espace de cinq ans entre 2019 et 2024. Tout ceci amène à une sous-estimation de l'emprise réelle de la lumière artificielle nocturne.

6. Apports et perspectives

Ce travail produit un protocole reproductible afin de prioriser les mesures et la mise en place d'une trame noire. À travers l'identification de la trame lumineuse et de la cartographie des hotspots, les zones du réseau opérationnel et les corridors affectés sont mis en évidence. Les résultats sont directement exploitables et permettent d'intégrer la pollution lumineuse dans la réflexion d'un réseau écologique pensé aussi bien pour les espèces diurnes que crépusculaires et nocturnes. À plus long terme, la méthodologie peut être améliorée en intégrant : une série temporelle d'images nocturnes, des mesures radiométriques au sol et une couche de points lumineux plus exhaustive. Ces développements permettront de réaliser des modélisations intégrant plus efficacement l'éclairage nocturne dans le contexte du Sart-Tilman.

Conclusion

Ce mémoire fournit un cadre analytique et opérationnel afin d'évaluer l'emprise de la lumière artificielle nocturne sur le site du Sart-Tilman. Celui-ci est situé en périphérie de la ville de Liège et comprend un campus de l'Université de Liège, le CHU ainsi que de nombreux sites d'intérêts pour la biodiversité. L'Université de Liège s'est également dotée récemment d'un réseau écologique propre au site composé de quatre trames. La première regroupe les forêts feuillues humides et mésophiles, la seconde représente les lisières, la troisième les milieux ouverts secs et la quatrième les prairies. Dans ce cadre forestier, un protocole reproductible est mis en place afin d'évaluer la pertinence de l'intégration d'une trame noire.

La méthodologie conçue et appliquée combine plusieurs éléments. L'acquisition et le traitement d'une image satellitaire nocturne, la production de données d'intensité lumineuse et la création d'une trame lumineuse, intégrant la lumière observée et la lumière potentielle qui est composée des points lumineux présents. Ces données ont été croisées spatialement avec l'occupation du sol, le réseau écologique existant et un inventaire des chiroptères présents afin d'identifier les zones de conflits et les enjeux liés à la pollution lumineuse. Les observations sont partiellement confirmées par des photos réalisées durant la nuit sur le site. La méthodologie est segmentée en quatre étapes distinctes qui sont l'obtention des données, le diagnostic, l'identification des zones de conflits et le départage des enjeux en fonction des activités anthropiques et des besoins de la biodiversité.

Les analyses réalisées démontrent que l'emprise absolue de la lumière sur le Sart-Tilman est relativement limitée en superficie avec 2 % de la surface du site. Toutefois, la configuration spatiale de cette emprise génère des effets écologiques significatifs. La luminance est principalement structurée par le réseau routier où les axes majeurs et les voiries communales concentrent la majorité des pixels éclairés et forment des lignes de forces lumineuses. Le paysage est caractérisé par plus de 75 % de pixels compris entre 85 et 140 $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, dont 35 % entre 85 et 100 $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$. Cette structure présente également des nœuds d'intensité élevées associés à des infrastructures anthropiques particulières.

En croisant la trame lumineuse avec le réseau écologique, il apparaît que les zones centrales des trames forestières conservent largement leur obscurité structurelle car les impacts s'observent principalement en lisière. À l'inverse, les zones de développement ainsi que la

trame des prairies sont exposées de façon plus directe et présentent une susceptibilité élevée à la fragmentation des zones écologiques durant la nuit. Cette fragmentation se retrouve également sur les corridors écologiques et principalement, ceux de la sous-trame forestière mésophile. Les intersections entre la trame lumineuse et le réseau écologique sont concentrées sur trois points chauds qui sont le campus, le CHU et le Blanc Gravier. De plus, l'inventaire des chauves-souris a permis de recenser 17 espèces dont certaines ayant un statut de protection au sein de la liste des espèces wallonnes. Cet inventaire souligne l'intérêt du Sart-Tilman dans la protection de la biodiversité ainsi que sa vulnérabilité aux perturbations lumineuses. Sur base de ces éléments, la question centrale de ce mémoire, « *la mise en place d'une trame noire est-elle pertinente ?* », reçoit une réponse nuancée. En effet, la surface éclairée semble globalement faible et les zones centrales forestières sont relativement intactes. Néanmoins, les trames sont fragmentées au sein des hotspots identifiés et la connectivité entre les zones d'une même trame est dégradée, ce qui requiert des actions à minima ciblées sur les trois hotspots.

Sur base de ces constats, ce mémoire propose un plan d'action hiérarchisé et pragmatique. La priorité principale est le campus où la densité et la persistance de l'éclairage après les heures d'activités offrent un fort potentiel de conservation et de préservation du paysage nocturne. Les mesures recommandées comprennent l'extinction partielle ou programmée des éclairages non essentiels, le dimming progressif et l'usage de détecteurs de présence comme sur les parkings. La réduction de la température de couleur est également un aspect intéressant afin de réduire la diffusion de la composante bleue de la lumière. La seconde priorité vise le Blanc Gravier où la gestion des horaires d'éclairage après les événements sportifs et dans les allées est suffisante pour limiter l'impact de l'éclairage sur ce site. Enfin, sur le CHU, les contraintes opérationnelles empêchent une extinction totale du site.

La méthodologie développée est reproductible et mobilisable par les gestionnaires locaux mais plusieurs limites méthodologiques sont à prendre en compte. L'image satellite seule ne permet pas de percevoir l'ensemble de la pollution lumineuse écologique, ce qui se confirme par les photographies du terrain. Le faible SNR des bandes spectrales verte et bleue limite la discrimination des types de sources lumineuses. La couche de point lumineux est incomplète et l'hétérogénéité temporelle des données peut introduire des imprécisions dans les observations. Ces limites impliquent que les estimations sont probablement sous-estimées dans les résultats. Néanmoins, ce travail ouvre des perspectives opérationnelles en réalisant des modèles de perméabilité du paysage en intégrant l'intensité lumineuse comme un coût de déplacement et en prenant en compte les variations saisonnières. La trame noire se présente alors comme un

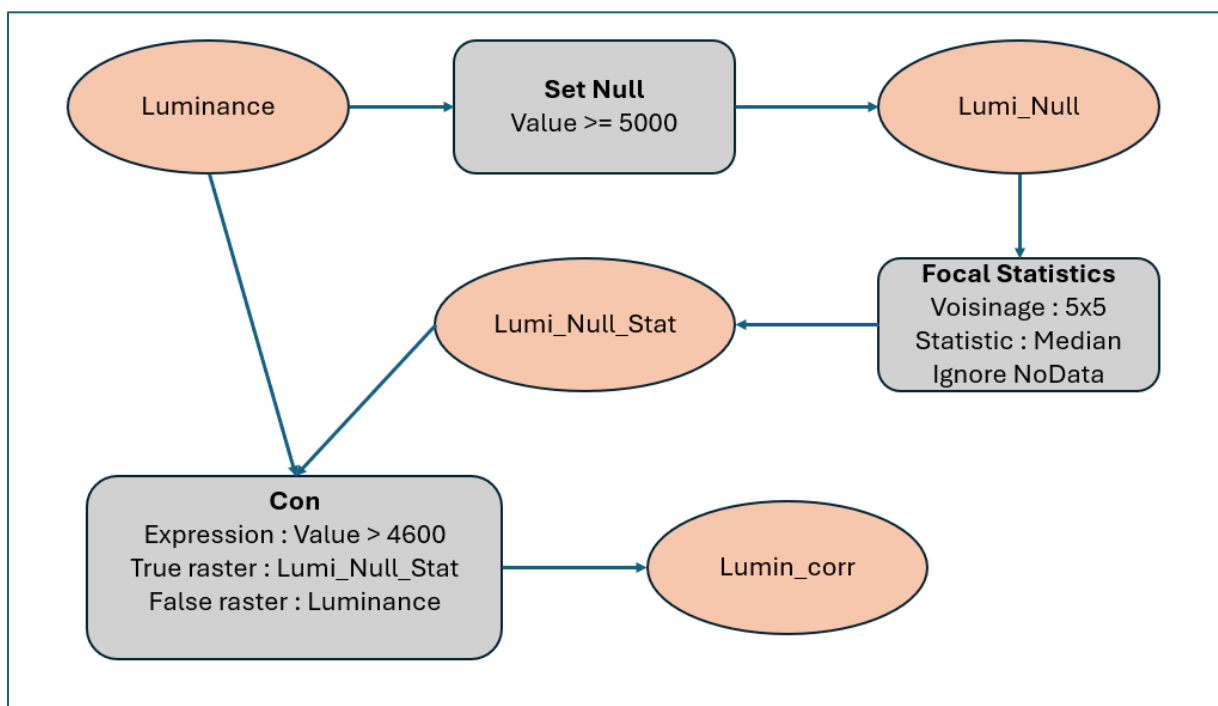
outil opérationnel afin de concilier les activités humaines et les exigences de la conservation nocturne.

En conclusion, le Sart-Tilman illustre l'impact de la lumière artificielle nocturne. Malgré l'emprise spatiale modeste à l'échelle du paysage, la capacité à fragmenter les continuités écologiques est élevée. Dès lors, la mise en place d'un trame noire ciblée, soutenue par des mesures techniques appropriées, constitue une réponse efficace pour préserver la biodiversité nocturne sans compromettre les usages humains essentiels. Ce mémoire livre à la fois une méthode reproductible ainsi que des priorités d'actions concrètes. De ce fait, il propose un cadre mobilisable pour gérer le paysage nocturne du Sart-Tilman.

Annexes

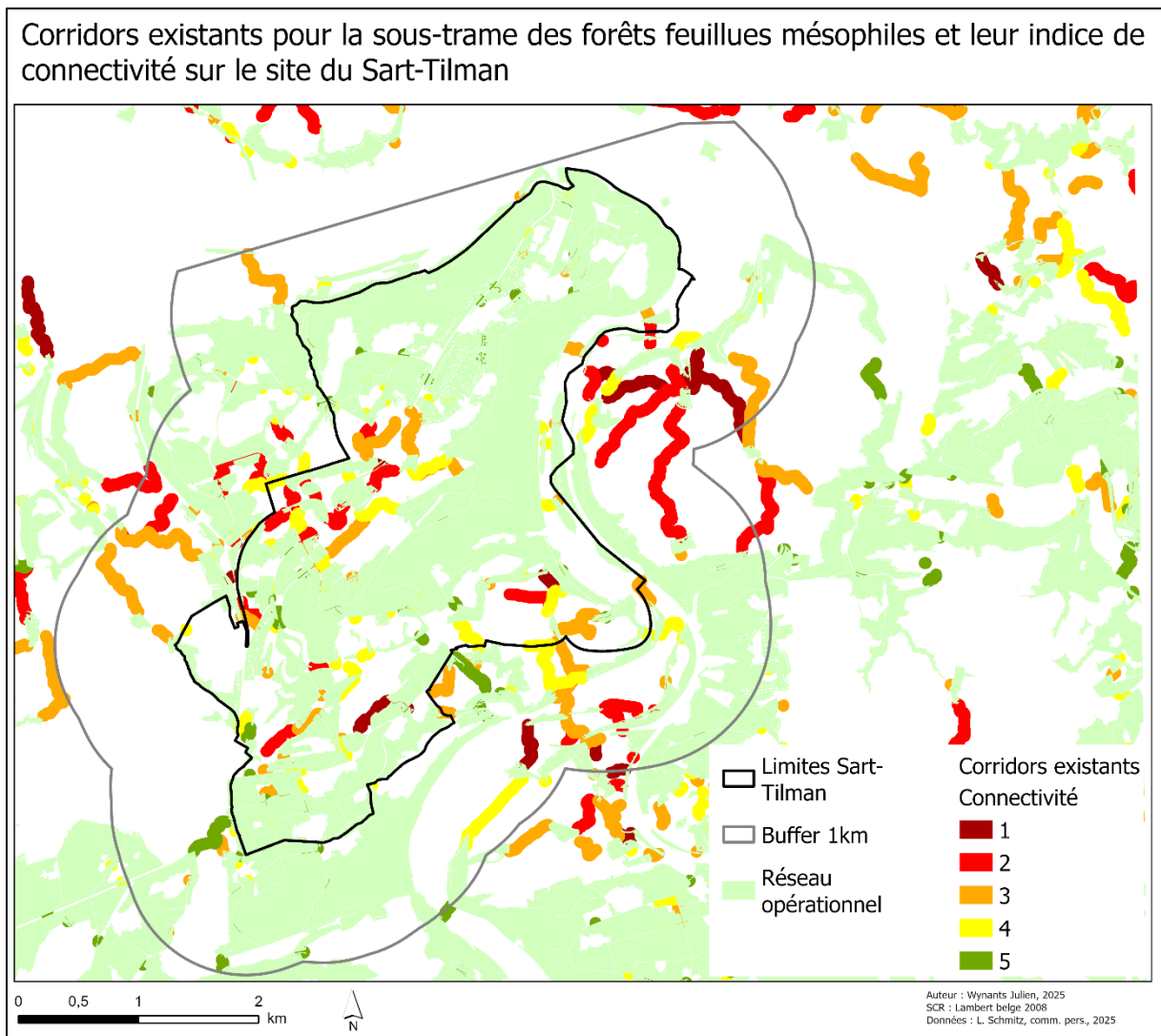
Annexe 1 : chaîne de traitements.

Le schéma traduit les étapes réalisées pour passer du raster de luminance initial avec les valeurs considérées comme aberrantes au raster final corrigé. Les rectangles gris symbolisent les fonctions utilisées et les ellipses représentent les rasters d'entrées et de sorties. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.



Annexe 2 :

Corridors existants de la sous-trame des forêts feuillues mésophiles et leur indice de connectivité sur le site du Sart-Tilman. L'indice de connectivité traduit l'importance d'un corridor au sein du réseau. Plus la valeur est élevée et plus le corridor est central. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.



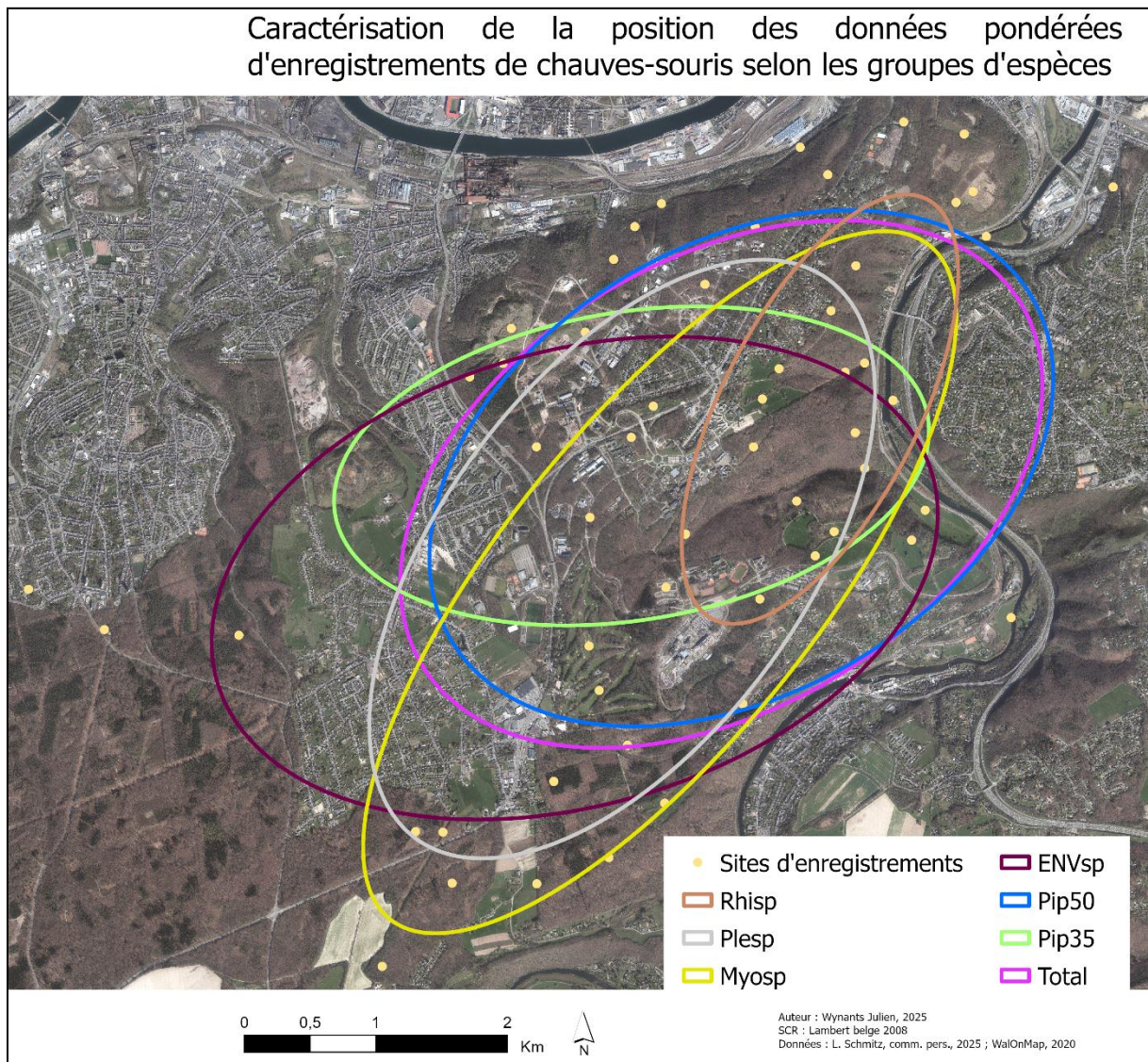
Annexe 3 :

Tableau reprenant les données précises de l'inventaire des chauves-souris de 2023. Les codes utilisés correspondent à : ChiroSp = Chauves-souris indéterminées, ENVsp = Sérotines et noctules, Myosp = Murins, Pip35 = Pipistrelles basse fréquence, Pip50 = Pipistrelles haute fréquence, Plesp = Oreillards, Rhisp = Rhinolophes, Tot = nombre total d'enregistrements par site.

Sites	ChiroSp	ENVsp	Myosp	Pip35	Pip50	Plesp	Rhisp	Tot	Nb taxons	X	Y
Bois St Jean - plateau calamite	1	5	0	3	0	0	0	9	6	233571	143334
Ulg - incendie	17	7	0	0	16	0	0	40	5	236188	142541
BSJ - derrière BEA	8	1	0	0	42	0	0	51	2	235429	144103
ulg - ligne elec rte condroz	3	3	0	25	50	0	0	81	6	234485	142505
ulg - prairie vété 2	24	7	4	3	148	0	0	186	14	236026	141787
Ulg - prairie hômes 2	19	43	1	0	217	0	0	280	6	235607	143026
Ulg - polytech	43	6	0	0	324	0	0	373	7	234169	141896
maison forestiere Vecquee	80	235	5	5	359	0	0	684	7	230476	141042
BSJ - prairies snbc 2	10	26	0	0	370	0	0	406	6	235767	144711
Streupas 2	86	17	2	13	586	0	0	704	9	237084	144373
vecquée - grande plantation	207	81	3	14	637	0	0	942	13	232842	139506
Bois plainevaux - ruisseau	145	1	115	0	653	0	0	914	9	232590	138482
Belle jardinière - ligne Elia	34	6	0	3	811	0	0	854	10	236557	144903
Ulg - rue fond du moulin	1069	388	0	4	1060	0	0	2521	9	235333	140476
Domicile	41	11	0	2	1183	0	0	1237	11	223963	135915
BSJ - pré aily	40	16	0	1	1660	0	0	1717	8	235045	143669
Bois du Roi	375	139	1	2	1860	0	0	2377	9	250334	159323
Colonster - Station d'épuration d'embourg	31	4	5	11	2122	0	0	2173	10	236476	142786
Bois St Jean - ruisseau du Renory	79	3	9	1	2424	0	0	2516	12	234349	143857
Nomont - prairie beau regard	17	36	4	0	236	1	0	294	9	233766	139109
Nomont - sud	215	7	19	1	482	1	0	725	9	234314	139308
ulg - parking Florkin	92	18	2	7	615	1	0	735	9	234747	141363
Bois St Jean - zone cloturee	216	297	7	10	1116	1	0	1647	13	234135	143303
BSJ - derrière centre spatial	86	2	1	1	2101	1	0	2192	8	234511	144106
Seraing - jardin Hemart	317	642	3	42	2331	1	0	3336	13	229898	141348
Prés de Tilff	1016	178	9	77	6142	1	0	7423	12	237373	141134
Ulg - RNA 2	213	11	0	0	258	2	0	484	11	236192	143810
BSJ - prairies snbc 1	17	13	2	0	615	2	0	649	12	234714	144282
Nomont - pins	245	447	5	7	735	2	0	1441	10	234455	140164
Embourg	26	14	3	8	1712	2	0	1765	11	238149	144408
Ile St Paul	118	48	5	17	2353	2	0	2543	13	237185	144033
ulg - prairie chateau	180	70	4	31	4463	2	0	4750	12	236616	141722

Bois St Jean - Biémoulin	421	14	31	24	4952	2	0	5444	10	233254	142965
Ulg - parking vété	128	5	4	0	233	3	0	373	9	235462	141275
ulg - prairie vété 1	57	7	1	16	489	3	0	573	12	235884	141602
ulg - mab gestrafor	79	26	4	10	551	4	0	674	12	235741	142021
Streupas 4	20	67	0	3	632	4	0	726	10	237016	144812
Streupas 1	108	15	10	8	1408	4	0	1553	13	236953	144290
ULg - cense rouge	173	91	0	7	519	5	0	795	11	234651	142742
Vecquée - chapeau chinois	794	9	7	3	773	5	0	1591	12	231500	141000
ulg - trois sapins	735	366	111	45	2424	7	0	3688	16	235413	142431
ulg - golf 1	166	478	14	4	433	8	0	1103	12	234239	140581
ulg - au soleil	220	25	23	15	1339	8	0	1630	14	234897	141769
ulg - golf 2	935	320	9	18	2897	9	0	4188	14	234163	140918
Nomont - prairie bbq	68	101	11	3	1000	10	0	1193	14	234737	139722
Bois plaineaux - mare	368	67	70	3	2423	11	0	2942	11	233122	139114
Bois St Jean - bassin orange sud	81	43	3	21	2952	12	0	3112	12	233508	143066
vecquée - petite elia	584	59	10	19	1201	18	0	1891	16	233052	139501
Bois St Jean - ligne Elia	817	401	9	632	1618	24	0	3501	12	233763	142432
Ulg - ruisseau Sordeye bas	92	1	20	45	2737	0	1	2896	10	236111	142999
Colonster - station épuration	196	10	57	47	3625	0	1	3936	12	236475	142784
ulg - etang blanc gravier	204	52	6	2	15689	0	1	15954	14	236260	142268
BSJ - ruisseau de Kinkempois	47	5	18	0	1258	1	1	1330	9	235979	144501
ulg - prairie colonster	91	17	31	11	1310	1	1	1462	13	236720	141950
ulg - prairie hômes 1	129	389	10	23	514	2	1	1068	14	235481	142795
Colonster - Rau de sordeye	48	30	50	8	1301	8	1	1446	12	236259	143069
Nomont - 4 carrés	780	499	9	0	2543	9	1	3841	15	233894	139887
Ulg - RNA 3	2142	74	22	11	3512	1	2	5764	11	236003	143466

La carte représente la caractérisation de la position des données pondérées d'enregistrements.
Auteur : WYNANTS Julien, 2025.



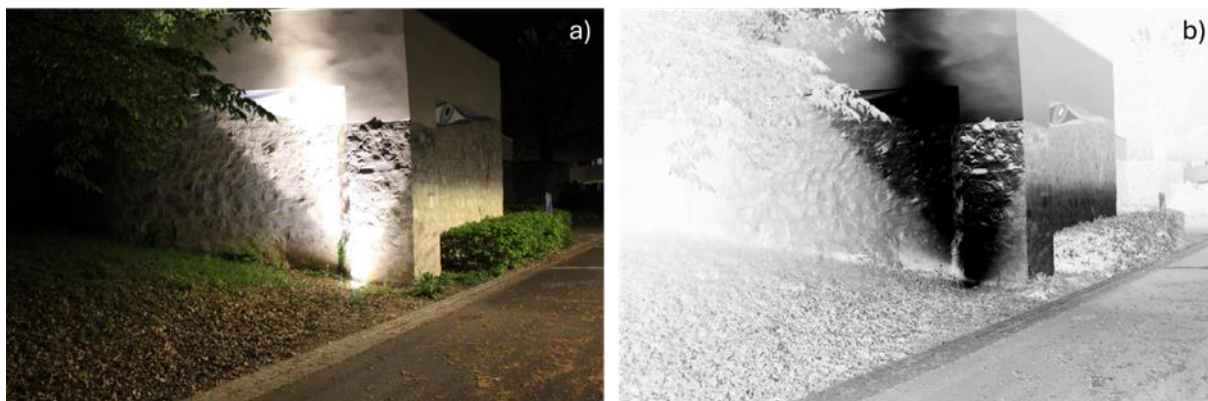
Annexe 4 :

Photo du muret des escaliers en direction du B7a. La photo a été prise à 23h45. Auteur : WYNANTS Julien, 16 avril 2025.



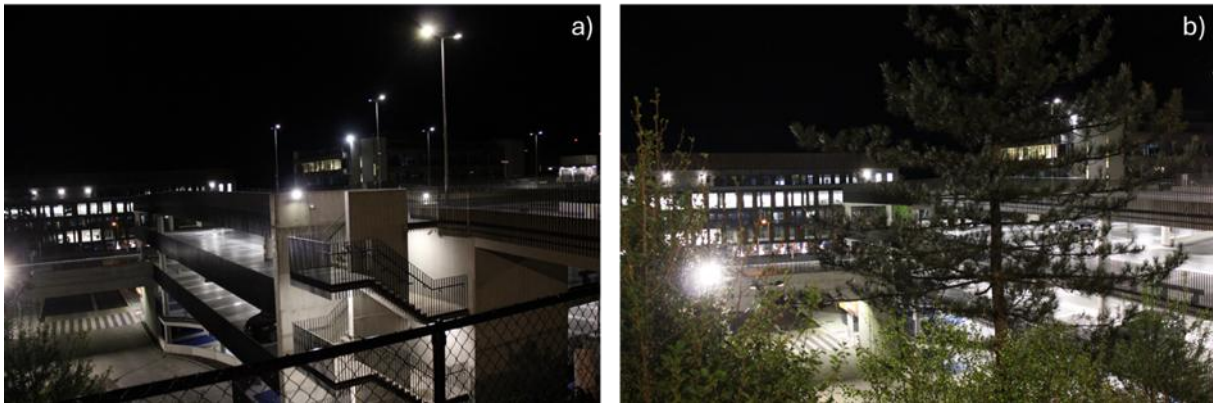
Annexe 5 :

Photo de la façade du B7b. a) photo originale, b) photo (a) modifiée sur le logiciel GIMP, les zones blanches correspondent aux zones sombres dans la photo (a) et inversement. La photo a été prise à 23h40. Auteur : WYNANTS Julien, 16 avril 2025.



Annexe 6 :

Photos du CHU depuis la route. Les photos ont été prises à 00h03. Auteur : WYNANTS Julien, 17 avril 2025.



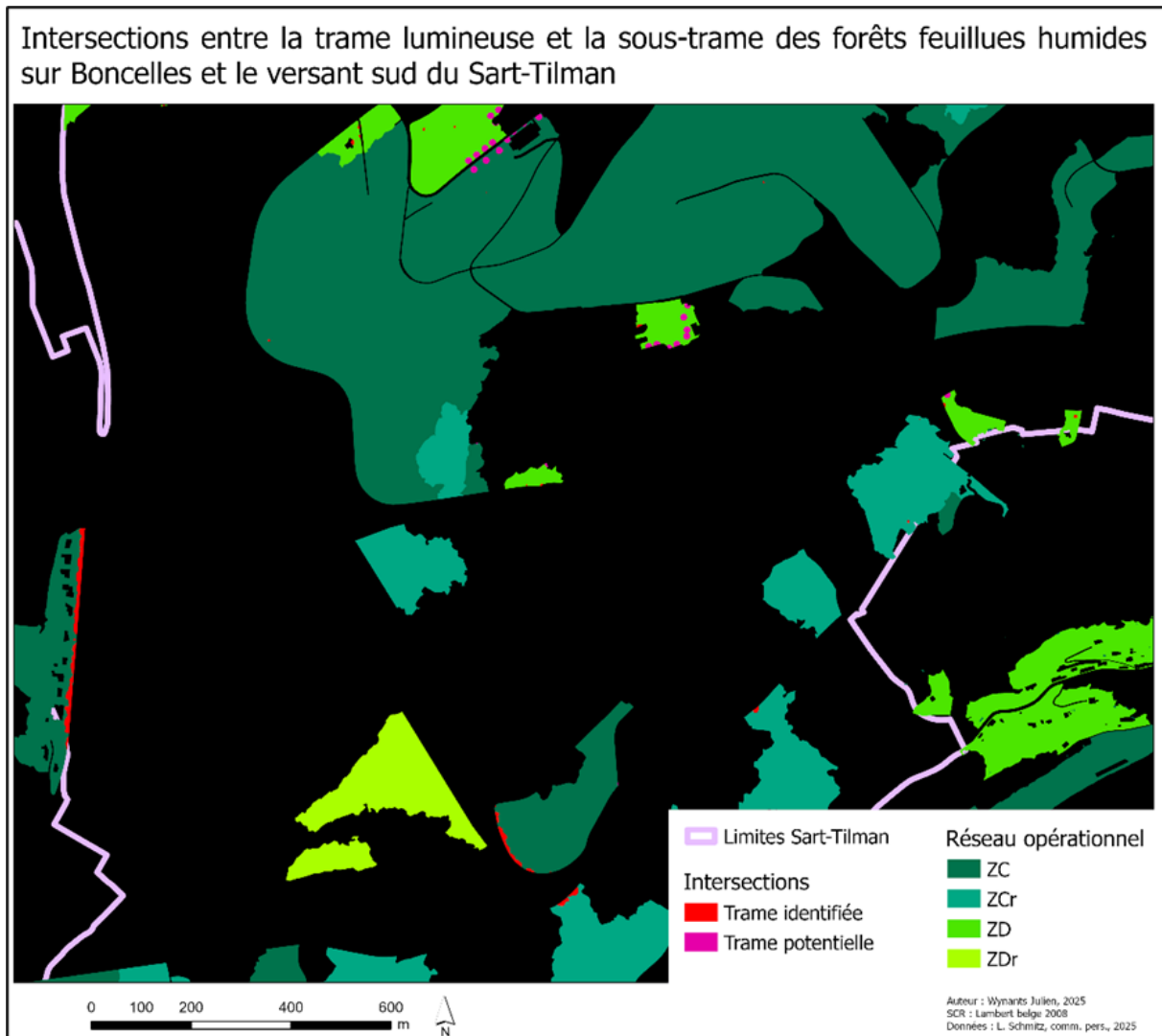
Annexe 7 :

Photo de la route du Condroz et du Science Park depuis la route. Les photos ont été prises à 00h08 et 00h15. Auteur : WYNANTS Julien, 17 avril 2025.



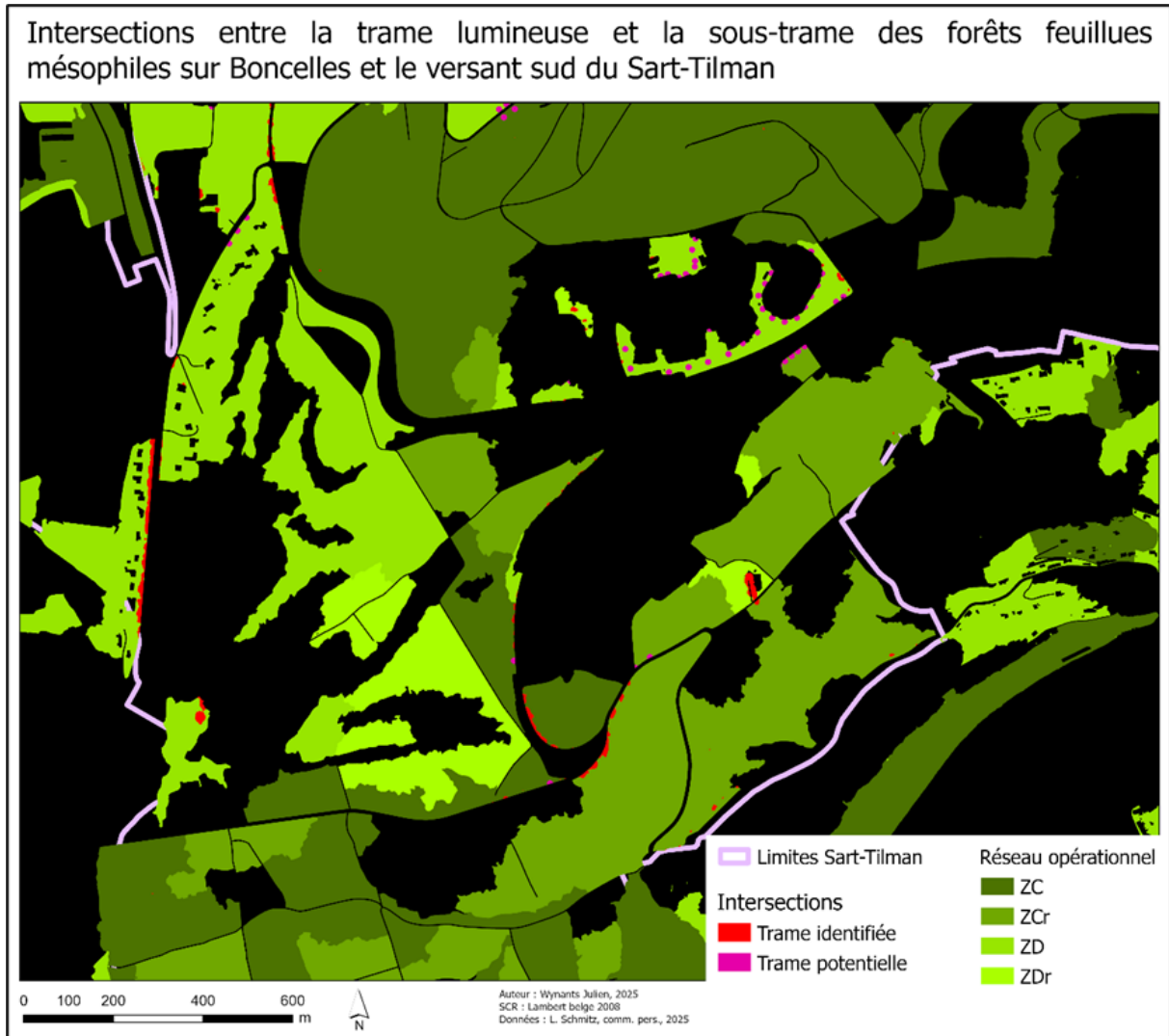
Annexe 8 :

Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la sous-trame des forêts feuillues humides. La carte est centrée sur le CHU. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.



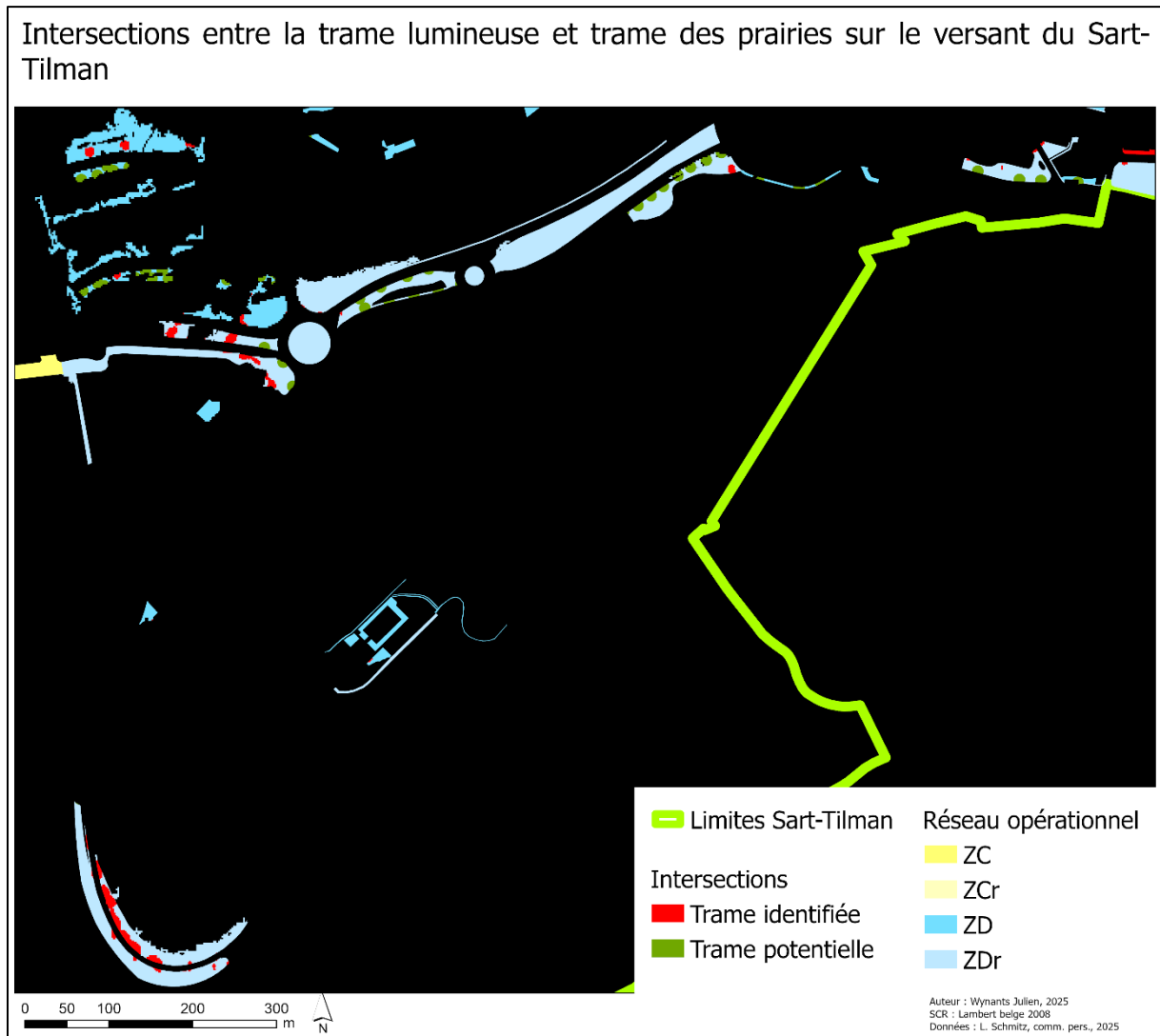
Annexe 9 :

Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la sous-trame des forêts feuillues mésophiles. La carte est centrée sur le CHU. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.



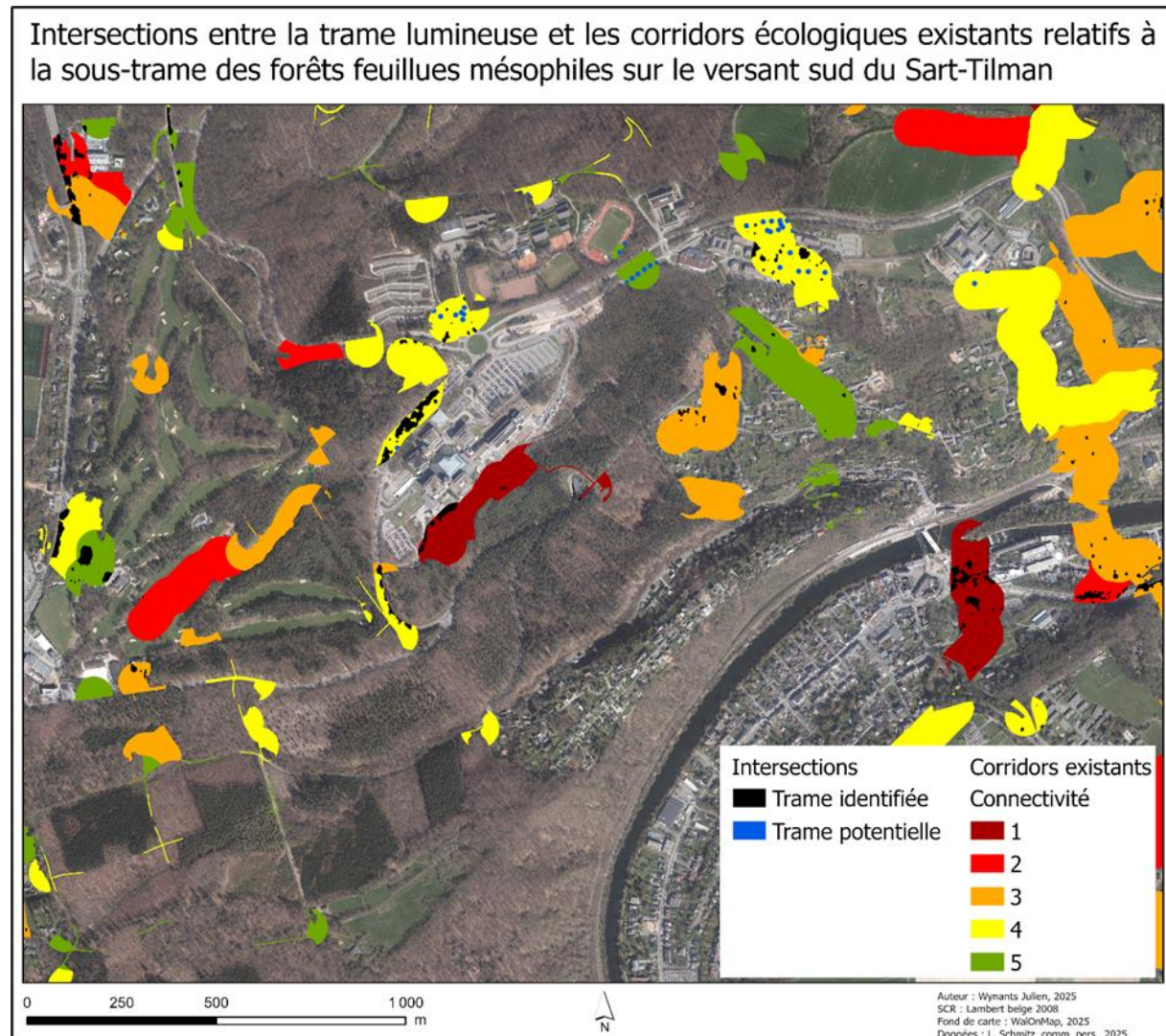
Annexe 10 :

Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et la trame des prairies. La carte est centrée sur le CHU et le Blanc Gravier. Le fond noir est appliqué afin de permettre une meilleure visualisation des intersections. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.



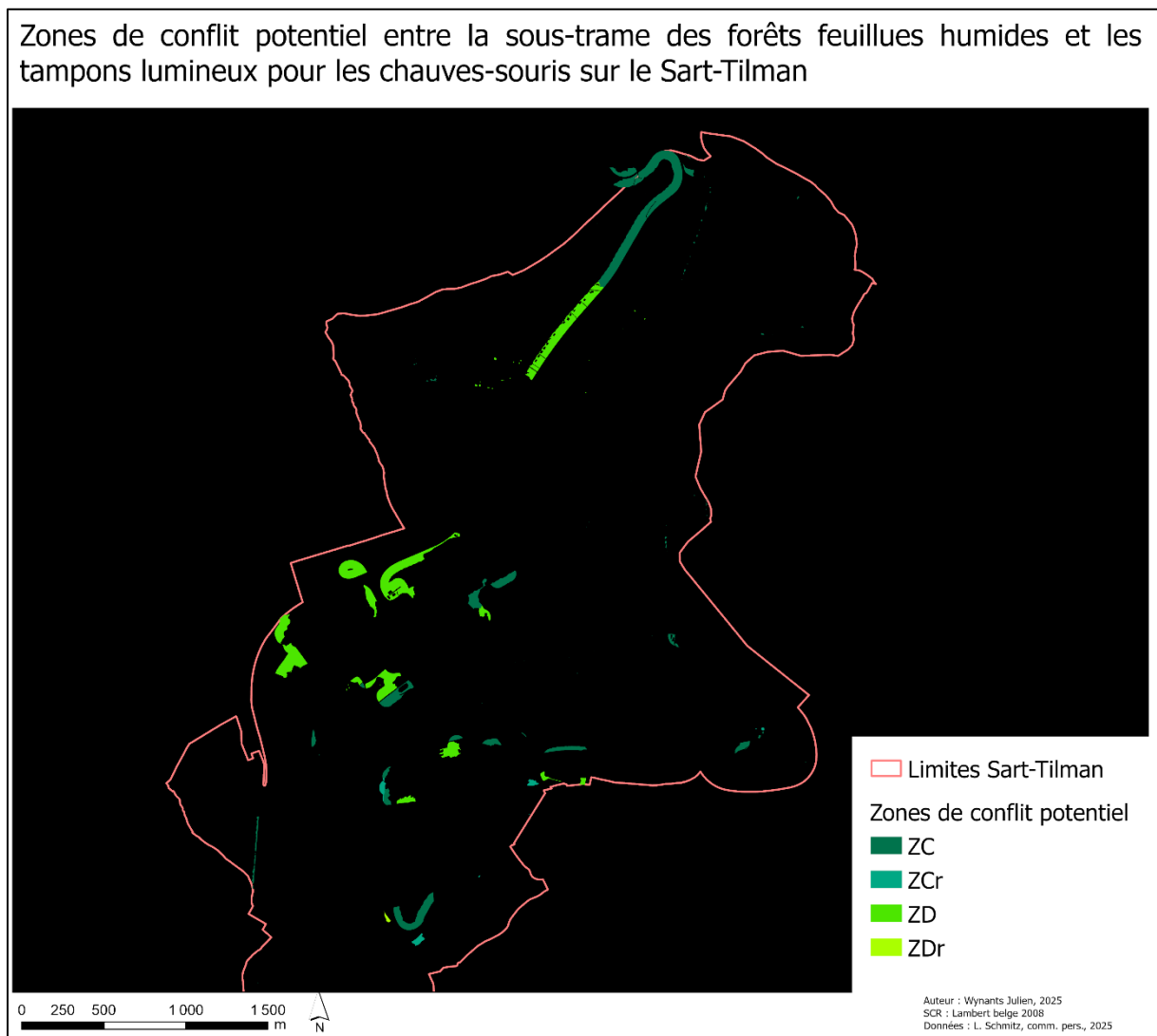
Annexe 11 :

Représentation cartographique des intersections entre la trame lumineuse et les corridors écologiques existants relatifs à la sous-trame des forêts feuillues mésophiles. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.



Annexe 12 :

Représentation cartographique des zones de conflit potentiel entre les tampons lumineux définis sur base des observations de Azam *et al.* (2018) et la sous-trame des forêts feuillues humides. Le fond noir n'a aucune signification et ne sert que de fond de carte. Auteur : WYNANTS Julien, 2025.



Bibliographie

- Anderson, S. J., Kubiszewski, I., & Sutton, P. C. (2024). The Ecological Economics of Light Pollution: Impacts on Ecosystem Service Value. *Remote Sensing*, 16(14), 2591. <https://doi.org/10.3390/rs16142591>
- Angerand, C. (2021). *Etude de la pollution lumineuse dans le cadre de la création d'une Trame Noire. Approche transversale pour la valorisation des paysages nocturnes. Le cas du Parc naturel Burdinale-Mehaigne, Wallonie*. Travail de fin d'études de master d'architecte paysagiste, Liège, Université de Liège, inédit, 103 p. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/11891>. Consulté le 3 décembre 2024.
- ANPCEN. (2024). Villes et Villages étoilés : un label national organisé par l'ANPCEN. ANPCEN. https://www.anpcen.fr/?id_rub=19. Consulté le 30 mai 2025.
- ASCEN. (2019). *Charte « Province de Luxembourg, espace étoilé »*. Association pour la sauvegarde du ciel et de l'environnement nocturnes. http://ascen.be/documents/Charte_Province_de_Luxembourg_signee_03.05.2019.pdf. Consulté le 13 décembre 2024.
- ASCEN. (2025). *Nuit de l'Obscurité*. ASCEN. <http://www.ascen.be/no/index.htm>. Consulté le 9 juin 2025.
- Aulsebrook, A. E., Jones, T. M., Mulder, R. A., & Lesku, J. A. (2018). Impacts of artificial light at night on sleep: A review and prospectus. *Journal of Experimental Zoology. Part A, Ecological and Integrative Physiology*, 329(8–9), 409–418. <https://doi.org/10.1002/jez.2189>
- Azam, C., Le Viol, I., Julien, J.-F., Bas, Y., & Kerbirou, C. (2016). Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landscape Ecology*, 31(10), 2471–2483. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0417-3>
- Azam, C., Le Viol, I., Bas, Y., Zissis, G., Vernet, A., Julien, J.-F., & Kerbirou, C. (2018). Evidence for distance and illuminance thresholds in the effects of artificial lighting on bat activity. *Landscape and Urban Planning*, 175(5), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.02.011>
- Bará, S., Rigueiro, I., & Lima, R. C. (2019). Monitoring transition: Expected night sky brightness trends in different photometric bands. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 239, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106644>
- Battisti, C. (2003). Habitat fragmentation, fauna and ecological network planning: Toward a theoretical conceptual framework. *Italian Journal of Zoology*, 70(3), 241–247. <https://doi.org/10.1080/11250000309356524>
- Bebonne, E., Heng, S., & Limbourg, S. (2024). Towards sustainable nocturnal environment management: a social-ecological-technical system analysis in Wallonia (Belgium). *Discover Environment*, 2(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00128-z>
- Biodiversité en Wallonie. (s.d.). *La trame noire en Wallonie*. Service Public de Wallonie. <https://biodiversite.wallonie.be/fr/trame-noire.html?IDC=6635>. Consulté le 3 décembre 2024.
- Bobkowska, K., Burdziakowski, P., Tysiac, P., & Pulas, M. (2024). An Innovative New Approach to Light Pollution Measurement by Drone. *Drones (Basel)*, 8(9), 504-. <https://doi.org/10.3390/drones8090504>
- Bogaert, J., Vranken, I., & Andre, M. (2014). Chapter 8: Anthropogenic effects in landscapes: Historical context and spatial pattern. In S.-K. Hong, J. Bogaert & Q. Min (Eds.), *Biocultural Landscapes: Diversity, Functions and Values*. Pays-Bas: Springer Netherlands, 89–112.
- Bompard, M. (2020). *Garantie effective du ciel nocturne comme patrimoine mondial à préserver*. Parlement européen. [Question parlementaire | Garantie effective du ciel nocturne comme patrimoine mondial à préserver | E-001680/2020 | Parlement européen](https://www.europarl.europa.eu/press-room/fr/press-room-detail/question-parlementaire/garantie-effective-du-ciel-nocturne-comme-patrimoine-mondial-a-preserver/E-001680/2020/Parlement-europeen). Consulté le 29 mai 2025.
- Bullough, J. D. (2009). Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. *Journal of Modern Optics*, 56(13), 1518–1522. <https://doi.org/10.1080/09500340903045710>

- Bullough, J. D., Donnell, E. T., & Rea, M. S. (2013). To illuminate or not to illuminate: Roadway lighting as it affects traffic safety at intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 53, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.12.029>
- Challéat, S. (2011). La nuit, une nouvelle question pour la géographie: Nighttime: a new topic for geography. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 88(2), 183–196. <https://doi.org/10.3406/bagf.2011.8217>
- Challéat, S., & Lapostolle, D. (2014). (Ré)concilier éclairage urbain et environnement nocturne : les enjeux d'une controverse sociotechnique. *Natures sciences sociétés (Montrouge)*, 22(4), 317–328. <https://doi.org/10.1051/nss/2014045>
- Challéat, S., Barré, K., Laforge, A., Lapostolle, D., Franchomme, M., Sirami, C., Le Viol, I., Milian, J., & Kerbirou, C. (2021). Grasping darkness: the dark ecological network as a social-ecological framework to limit the impacts of light pollution on biodiversity. *Ecology and Society*, 26(1), 15. <https://doi.org/10.5751/ES-12156-260115>
- Cinzano, P., & Falchi, F. (2014). Quantifying light pollution. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 139, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.11.020>
- Connor, E. F., & McCoy, E. D. (1979). The Statistics and Biology of the Species-Area Relationship. *The American Naturalist*, 113(6), 791–833. <https://doi.org/10.1086/283438>
- Commission européenne. (2025a). *Environmental Impact Assessment*. Commission européenne. https://environment.ec.europa.eu/law-and-governance/environmental-assessments/environmental-impact-assessment_en. Consulté le 13 mai 2025.
- Commission européenne. (2025b). *Strategic Environmental Assessment*. Commission européenne. https://environment.ec.europa.eu/law-and-governance/environmental-assessments/strategic-environmental-assessment_en. Consulté le 13 mai 2025.
- Dale, M. R. T., & Fortin, M.-J. (2010). From Graphs to Spatial Graphs. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 41(1), 21–38. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144718>
- DarkSky International. (2024). *All International Dark Sky Places*. DarkSky International. https://darksky.org/what-we-do/international-dark-sky-places/all-places/?select_a_place_type=international-dark-sky-reserve. Consulté le 5 mai 2025.
- Denoël, M. (1996). Phénologie et domaine vital de la salamandre terrestre *Salamandra salamandra terrestris* (Amphibia, Caudata) dans un bois du Pays de Herve (Belgique). *Cahiers d'Ethologie*, 16, 291–306. <https://hdl.handle.net/2268/3224>
- Donnell, E. T., Porter, R. J., & Shankar, V. N. (2010). A framework for estimating the safety effects of roadway lighting at intersections. *Safety Science*, 48(10), 1436–1444. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.06.008>
- Dunn, N. (2020). Dark Design: A New Framework for Advocacy and Creativity for the Nocturnal Commons. *International Journal of Design in Society*, 14(4), 19–30. <https://doi.org/10.18848/2325-1328/CGP/v14i04/19-30>
- Elvidge, C. D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C., & Ghosh, T. (2017). VIIRS night-time lights. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 5860–5879. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1342050>
- Faburé, J., Mougin, C., Rivet, D. & Siauxsat, D. (eds.). (2022). Chapitre 1. Les pollutions. In *Écotoxicologie : Cours Applications*. France : Dunod, Sciences Sup, 1–14 <https://stm.cairn.info/ecotoxicologie--9782100818167-page-1?lang=fr>.
- Fahrig, L. (2013). Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. *Journal of Biogeography*, 40(9), 1649–1663. <https://doi.org/10.1111/jbi.12130>
- Falchi, F., Cinzano, P., Elvidge, C. D., Keith, D. M., & Haim, A. (2011). Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2714–2722. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.029>

- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), 25. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>
- Falcón, J., Torriglia, A., Attia, D., Viénot, F., Gronfier, C., Behar-Cohen, F., Martinsons, C., & Hicks, D. (2020). Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 39. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.602796>
- Fischer, J., & Lindenmayer, D. B. (2007). Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, 16(3), 265–280. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00287.x>
- Francis, R. A., & Antrop, M. (2021). A brief history and overview of landscape ecology. In Francis, R.A., Millington, J.D.A., Perry, G.L.W., & Minor, E.S. (eds.). *The Routledge handbook of landscape ecology*. 1. Routledge, 1–22. <https://doi.org/10.4324/9780429399480-1>
- Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W., & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 88(4), 912–927. <https://doi.org/10.1111/brv.12036>
- Géoconfluences. (2025). *Glossaire, Ecotone*. Géoconfluences. <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/ecotone>. Consulté le 12 août 2025.
- Géoportail de la Wallonie. (2021). *Eclairage public communal inutilement gênant pour la biodiversité*. SPW. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/ffc97e33-2af7-4e06-adfd-e76b1a137fe0.html>. Consulté le 3 décembre 2024.
- Géoportail de la Wallonie. (2022a). *Poteaux d'éclairage public régional*. SPW. <http://geodata.wallonie.be/id/48a056ac-cae5-4b59-882a-f26b3688bc06>. Consulté le 3 mars 2025.
- Géoportail de la Wallonie. (2022b). *Occupation du sol en Wallonie - WALOUS 2020*. Service public de Wallonie (SPW). <http://geodata.wallonie.be/id/47b348f1-6e7a-4baa-963c-0232a43c0cff>. Consulté le 3 mars 2025.
- Géoportail de la Wallonie. (2025). *Projet Informatique de Cartographie Continue*. Service public de Wallonie (SPW). <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/b795de68-726c-4bdf-a62a-a42686aa5b6f.html>. Consulté le 3 mars 2025.
- Gillet, L., Coppée, T., Mahy, G. & Dufrene, M., (2024). Analyse du réseau écologique et des fonctions de connectivités, en regard du plan d'urbanisation, du site du Sart Tilman, Rapport final. Gembloux Agro-Bio Tech, Liège Université. 109 p.
- Gouvernement flamand (1995). Décret portant dispositions générales et sectorielles en matière d'hygiène environnementale (Vlarem II). *Moniteur belge*, le 31 juillet 1995, 21447–22344.
- Grundland, M., & Dodgson, N. A. (2007). Decolorize: Fast, contrast enhancing, color to grayscale conversion. *Pattern Recognition*, 40(11), 2891–2896. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2006.11.003>
- Guk, E., & Levin, N. (2020). Analyzing spatial variability in night-time lights using a high spatial resolution color Jilin-1 image – Jerusalem as a case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163, 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.02.016>
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., Collins, C. D., Cook, W. M., Damschen, E. I., Ewers, R. M., Foster, B. L., Jenkins, C. N., King, A. J., Laurance, W. F., Levey, D. J., Margules, C. R., Melbourne, B. A., Nicholls, A. O., Orrock, J. L., Song, D. X. & Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), 9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
- Hale, J. D., Fairbrass, A. J., Matthews, T. J., Davies, G., & Sadler, J. P. (2015). Ecological impact of city lighting scenarios: exploring gap crossing thresholds for urban bats. *Global Change Biology*, 21(7), 2467–2478. <https://doi.org/10.1111/gcb.12884>
- Hao, Q., Wang, L., Liu, G., Ren, Z., Wu, Y., Yu, Z., & Yu, J. (2023). Exploring the construction of urban artificial light ecology: a systematic review and the future prospects of light pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(46), 101963–101988. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29462-0>

- Harchies, M., Boeraeve, F., Bourdouxhe, A., & Dufrière, M. (2018). *Cartographie du Réseau écologique wallon - Etat des lieux*. SPW/DGARNE, 74 p. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/298137>
- Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E. K., & Tockner, K. (2010). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in ecology & evolution*, 25(12), 681–682. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
- Huang, C., Ye, Y., Jin, Y., & Liang, B. (2023). Research Progress, Hotspots, and Evolution of Nighttime Light Pollution: Analysis Based on WOS Database and Remote Sensing Data. *Remote Sensing.*, 15(9), 1–34. <https://doi.org/10.3390/rs15092305>
- IBE-BIV. (2025). *La nouvelle norme NBN L18-004:2023 – Eclairage public – Sélection des classes d'éclairage*. Institute belge de l'éclairage – Belgisch instituut voor verlichtingskunde. [La nouvelle norme NBN L18-004:2023 - Eclairage public - Sélection des classes d'éclairage - BELGISCH INSTITUUT VOOR VERLICHTINGSKUNDE](https://www.ibe.be/fr/la-nouvelle-norme-nbn-l18-004-2023-eclairage-public-selection-des-classes-d-eclairage-belgisch-instituut-voor-verlichtingskunde). Consulté le 30 mai 2025.
- IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services). (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Guèze, M., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, A. L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razaque, J., Reyers, B., Roy Chowdhury, R., Shin, Y. J., Visseren-Hamakers, I. J., Willis, K. J. & Zayas C. N. (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- Jägerbrand, A. K., & Bouroussis, C. A. (2021). Ecological Impact of Artificial Light at Night: Effective Strategies and Measures to Deal with Protected Species and Habitats. *Sustainability*, 13(11), 5991. <https://doi.org/10.3390/su13115991>
- Janssens, P. (2024). Campus du Sart-Tilman, vers une mobilité douce. *Le Quinzième Jour*, 287, 16–17. https://www.lqj.uliege.be/cms/c_19267486/en/vers-une-mobilite-douce
- Ji, M., Xu, Y., Yan, Y., & Zhu, S. (2024). Evaluation of the light pollution in the nature reserves of China based on NPP/VIIRS nighttime light data. *International Journal of Digital Earth.*, 17(1), 16. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2347442>
- Jongman, R.H.G. (1995). Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks. *Landscape and Urban Planning.*, 32(3), 169–183. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(95\)00197-0](https://doi.org/10.1016/0169-2046(95)00197-0)
- Katz, Y., & Levin, N. (2016). Quantifying urban light pollution — A comparison between field measurements and EROS-B imagery. *Remote Sensing of Environment*, 177, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.017>
- Kirchhoff, T., Trepl, L., & Vicenzotti, V. (2013). What is Landscape Ecology? An Analysis and Evaluation of Six Different Conceptions. *Landscape Research and Landscape Research Extra.*, 38(1), 33–51. <https://doi.org/10.1080/01426397.2011.640751>
- Kral, K. (2010). Escape behaviour in blue-winged grasshoppers, *Oedipoda caerulea*. *Physiological Entomology*, 35(3), 240–248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2010.00735.x>
- Laforge, A., Pauwels, J., Faure, B., Bas, Y., Kerbirou, C., Fonderflick, J., & Besnard, A. (2019). Reducing light pollution improves connectivity for bats in urban landscapes. *Landscape Ecology*, 34(4), 793–809. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00803-0>
- Lebeau, J., Séleck, M., Mahy, G. (2016). *Rapport relatif à l'actualisation de l'étude et de la cartographie du réseau écologique du territoire de l'entité du Plan communal de Développement de la Nature de la Ville de Liège, Tranche I : Actualisation de l'inventaire du Plan communal de Développement de la Nature (P.C.D.N.) et identification des lignes de force du réseau écologique, Rapport Final*. Unité Biodiversité et Paysage, Gembloux Agro-Bio Tech. <https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communiaux/environnement/plan-nature/telechargements/pcdn/rapport-actualisation-pcdn.pdf>. Consulté le 5 mars 2025.
- Leve(n) de Nacht. (2025a). *Over ons*. Leve(n) de Nacht. <https://levendenacht.be/>. Consulté le 9 juin 2025.
- Leve(n) de Nacht. (2025b). *Nacht van de Duisternis*. Leve(n) de Nacht. <https://levendenacht.be/nachtvandeduisternis>. Consulté le 9 juin 2025.

- Levin, N., Kyba, C. C. M., Zhang, Q., Sánchez de Miguel, A., Román, M. O., Li, X., Portnov, B. A., Molthan, A. L., Jechow, A., Miller, S. D., Wang, Z., Shrestha, R. M., & Elvidge, C. D. (2020). Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111443. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111443>
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological Light Pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 191–198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- Maljean-Dubois, S. (2023). Les États, la nature et le droit... La Convention sur la diversité biologique à l'heure de la sixième extinction de masse. In *Le droit à l'épreuve de la société des sciences et des techniques "Liber amicorum" en l'honneur de Marie-Angèle Hermitte*. France : Academia University Press, 8. <https://shs.hal.science/halshs-04329395v1>
- Manfroid, J. (2002). L'astronomie dans le monde. *Le Ciel*, 64, 179–192. <https://hdl.handle.net/2268/221730>
- Marchant, P. (2019). Do brighter, whiter street lights improve road safety? *Significance* (Oxford, England), 16(5), 8–9. <https://doi.org/10.1111/j.1740-9713.2019.01313.x>
- Marchant, P., Hale, J. D., & Sadler, J. P. (2020). Does changing to brighter road lighting improve road safety? Multilevel longitudinal analysis of road traffic collision frequency during the relighting of a UK city. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 74(5), 467–472. <https://doi.org/10.1136/jech-2019-212208>
- Ministère de l'Agriculture, Ministère des Finances, Ministère de la Santé publique et de la Famille et Ministère des Travaux publics (1973). Loi sur la Conservation de la Nature du 11 juillet 1973. *Moniteur belge*, le 11 septembre 1973, 10306–10311.
- Morrell, S., Hatchell, J., Wordingham, F., Bennie, J., Inston, M. J., & Gaston, K. J. (2024). Changing streetlighting schemes and the ecological availability of darkness. *Journal of the Royal Society Interface*, 21(211). <https://doi.org/10.1098/rsif.2023.0555>
- Mosser, S. (2007). Eclairage et sécurité en ville : l'état des savoirs. *Déviance et société*, 31(1), 77-100. <https://doi.org/10.3917/ds.311.0077>
- Mougenot, C., & Meliïn, É. (2000). Entre science et action : le concept de réseau écologique. *Natures sciences sociétés (Montrouge)*, 8(3), 20-30. [https://doi.org/10.1016/S1240-1307\(00\)80057-6](https://doi.org/10.1016/S1240-1307(00)80057-6)
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature (London)*, 403(6772), 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- myULiège. (2024a). *Itinéraires cyclables*. MyMobility, MyULiège. https://my.mobility.uliege.be/cms/c_15714802/fr/faq-mymobility-itineraires-cyclables. Consulté le 28 juillet 2025.
- myULiège. (2024a). *Marcher vers et sur les campus*. MyMobility, MyULiège. https://my.mobility.uliege.be/cms/c_10547276/fr/mymobility-marcher-vers-et-sur-les-campus. Consulté le 28 juillet 2025.
- Natagora. (2021). *Actualisation des listes rouges wallonnes des espèces menacées, pour les groupes d'espèces amphibiens, reptiles, oiseaux et chauves-souris. Rapport final*. Étude réalisée pour le compte du SPW ARNE – DEMNA. https://etat.environnement.wallonie.be/files/Studies/2021_%c3%89tude%20Listes%20rouges%20et%20priorit%c3%a9s%20de%20conservation_Natagora.pdf. Consulté le 8 août 2025.
- Nations Unies. (s.d.). *La Convention sur la diversité biologique, traité international pour un avenir durable*. Nations Unies. [La Convention sur la diversité biologique | Nations Unies](https://www.un.org/fr/la-convention-sur-la-diversite-biologique). Consulté le 10 février 2025.
- Office fédéral du développement territorial ARE. (s.d.). *1987 : Le Rapport Brundtland*. Confédération suisse. <https://www.aren.admin.ch/aren/fr/home/media-et-publications/publications/developpement-durable/brundtland-report.html#contact>. Consulté le 1^{er} février 2025.

- Opdam, P. (1991). Metapopulation theory and habitat fragmentation: a review of holarctic breeding bird studies. *Landscape Ecology*, 5(2), 93–106. <https://doi.org/10.1007/BF00124663>
- Opdam, P., Steingröver, E., & Rooij, S. van. (2006). Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 75(3), 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.015>
- Pimm, S. L., Russell, G. J., Gittleman, J. L., & Brooks, T. M. (1995). The Future of Biodiversity. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 269(5222), 347–350. <https://doi.org/10.1126/science.269.5222.347>
- Poot, H., Ens, B. J., de Vries, H., Donners, M. A. H., Wernand, M. R., & Marquenie, J. M. (2008). Green Light for Nocturnally Migrating Birds. *Ecology and Society*, 13(2), 47. <https://doi.org/10.5751/es-02720-130247>
- Pouyat, R.V., Szlavecz, K., Yesilonis, I.D., Groffman, P.M. & Schwarz, K. (2010). Chemical, Physical, and Biological Characteristics of Urban Soils. In Aitkenhead-Peterson, J. & Volder, A. (eds), *Urban ecosystem ecology*. Etats-Unis : Agronomy Monograph, 55, 119–152, <https://doi.org/10.2134/agronmonogr55>
- Pouyat, R. V., & Trammell, T. L. E. (2019). Climate change and urban forest soils. In Busse, M., Giardina, C. P., Morris, D. M., Page-Dumroese, D. S. (eds), *Global Change and Forest Soils*. Elsevier, *Developments in Soil Science*, 36, 189–211. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00010-0>
- Ramade, F. (2022). 2. Le problème des pollutions et ses implications écologiques. In : *Éléments d'écologie Écologie appliquée : action de l'Homme sur la biosphère*. Paris : Dunod. *Sciences Sup*, p.47–72. <https://stm.cairn.info/elements-d-ecologie-ecologie-appliquee--9782100839247-page-47?lang=fr>.
- Remande C. (2010). Éclairage public : Réponses à 40 questions trop souvent dévoyées. *Lux, la revue de l'éclairage*, (Hors-série), 8 p. <http://www.afe-eclairage.com.fr/docs/10216-ext.pdf>. Consulté le 5 aout 2025.
- Riva, F., Haddad, N., Fahrig, L., & Banks-Leite, C. (2024). Principles for area-based biodiversity conservation. *Ecology Letters*, 27(6), e14459-n/a. <https://doi.org/10.1111/ele.14459>
- Rodrigo-Comino, J., Seeling, S., Seeger, M. K., & Ries, J. B. (2023). Light pollution: A review of the scientific literature. *The Anthropocene Review.*, 10(2), 367–392. <https://doi.org/10.1177/20530196211051209>
- Saad, R., Portnov, B. A., & Trop, T. (2021). Saving energy while maintaining the feeling of safety associated with urban street lighting. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(1), 251–269. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01974-0>
- Sánchez de Miguel, A., Kyba, C. C. M., Aubé, M., Zamorano, J., Cardiel, N., Tapia, C., Bennie, J., & Gaston, K. J. (2019). Colour remote sensing of the impact of artificial light at night (I): The potential of the International Space Station and other DSLR-based platforms. *Remote Sensing of Environment*, 224, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.035>
- Sanders, D., Hirt, M. R., Brose, U., Evans, D. M., Gaston, K. J., Gauzens, B., & Ryser, R. (2023). How artificial light at night may rewire ecological networks: Concepts and models. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 378(1892), 20220368. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0368>
- Schroer, S., Huggins, B. J., Azam, C., & Hölker, F. (2020). Working with Inadequate Tools: Legislative Shortcomings in Protection against Ecological Effects of Artificial Light at Night. *Sustainability*, 12(6), 2551. <https://doi.org/10.3390/su12062551>
- Smart Light-Hub. (s.d. a). *Smart Light-Hub, Résumé du projet*. Smart Light-Hub. <http://smartlighthub.eu/resume-du-projet/>. Consulté le 2 juin 2025.
- Smart Light-Hub. (s.d. b). *Conscientisation et intelligence collective, Démonstrateurs*. Smart Light-Hub. <http://smartlighthub.eu/demonstrateurs/>. Consulté le 2 juin 2025.
- Sordello, R. (2017). Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ? *Territoire en mouvement (Villeneuve-d'Ascq)*, 35, 24. <https://doi.org/10.4000/tem.4381>

- Sordello, R., Paquier, F., & Daloz, A. (2021). *Trame noire - Méthodes d'élaboration et outils pour sa mise en œuvre*. Office français de la biodiversité, 116.
- Sordello, R., Reyjol, Y., Amsallem, J., Bas, Y., Billon, L., Borner, L., Comolet-Tirman, J., Daoz, A., Dugué, A.-L., Guinard, É., Julien, J.-F., Lacoëuilhe, A., Lombard, A., Marmet, J., Mars, B., Marx, G., Ménard, C., Paquier, F., Schweigert, N., Thierry, C., Vanpeene, S., Vignon, V., Siblet, J.-P. (2022). Les déplacements des espèces volantes: vers la mise en œuvre d'une « Trame aérienne » dans le cadre de la politique Trame verte et bleue ? *Naturae*, 2022(9), 169-192. <https://doi.org/10.5852/naturae2022a9>
- SOFICO (Société wallonne de financement complémentaire des infrastructures). (2025). *Le Plan Lumière 4.0*. Wallonie infrastructures SOFICO. <https://sofico.org/fr/le-plan-lumieres-4-0/>. Consulté le 28 avril 2025.
- Starlight Initiative. (2025). *Starlight Declaration – La Palma*. Starlight Foundation – Spain. https://starlight2007.net/index_option_com_content_view_article_id_185_itemid_80_lang_en.html. Consulté le 14 mai 2025.
- Steinbach, R., Perkins, C., Tompson, L., Johnson, S., Armstrong, B., Green, J., Grundy, C., Wilkinson, P., & Edwards, P. (2015). The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 69(11), 1118–1124. <https://doi.org/10.1136/jech-2015-206012>
- Stone, T. (2018). The Value of Darkness: A Moral Framework for Urban Nighttime Lighting. *Science and Engineering Ethics*, 24(2), 607–628. <https://doi.org/10.1007/s11948-017-9924-0>
- Sullivan, J. M., & Flanagan, M. J. (2002). The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions. *Accident Analysis and Prevention*, 34(4), 487–498. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00046-X)
- Svechkina, A., Trop, T., & Portnov, B. A. (2020). How Much Lighting is Required to Feel Safe When Walking Through the Streets at Night? *Sustainability*, 12(8), 3133. <https://doi.org/10.3390/su12083133>
- Tini, M., Bardiani, M., Campanaro, A., Chiari, S., Mason, F., Maurizi, E., Toni, I., Audisio, P., & Carpaneto, G. M. (2017). A stag beetle's life: sex-related differences in daily activity and behaviour of *Lucanus cervus* (Coleoptera: Lucanidae). *Journal of Insect Conservation*, 21(5–6), 897–906. <https://doi.org/10.1007/s10841-017-0029-5>
- Tiwary, A., & Kumar, P. (2014). Impact evaluation of green–grey infrastructure interaction on built-space integrity: An emerging perspective to urban ecosystem service. *The Science of the Total Environment*, 487(1), 350–360. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.032>
- Tompson, L., Steinbach, R., Johnson, S. D., Teh, C. S., Perkins, C., Edwards, P., & Armstrong, B. (2023). Absence of Street Lighting May Prevent Vehicle Crime, but Spatial and Temporal Displacement Remains a Concern. *Journal of Quantitative Criminology*, 39(3), 603–623. <https://doi.org/10.1007/s10940-022-09539-8>
- UNESCO. (2020). *Astronomy and World Heritage Thematic Initiative, Statement Concerning Dark Skies and Celestial Objects*. UNESCO. <https://whc.unesco.org/en/astronomy/>. Consulté le 29 mai 2025.
- Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). (2023). *Stratégie mondiale de la conservation : la conservation des ressources vivantes au service du développement durable*. UICN. <https://portals.iucn.org/library/node/6425>. Consulté le 18 février 2025.
- Université de Liège. (2023). *Campus, Accès et mobilité, Accès et Plans, Campus de Liège Sart Tilman, Sart Tilman*. Université de Liège. https://www.campus.uliege.be/cms/c_5876706/fr/campus-de-liege-sart-tilman. Consulté le 7 juillet 2025.
- Van Der Ham. (2019). *Norme NF EN 13201 : exigences de performances éclairage public*. Light Zoom Lumière. [Norme NF EN 13201 : exigences de performances éclairage public](https://www.lightzoom.com/fr/norme-nf-en-13201-exigences-de-performances-eclairage-public). Consulté le 30 mai 2025.
- Vanvéber, A. (2022). *Extinction de l'éclairage public entre minuit et 5h : 164 communes ont déjà approuvé la proposition d'ORES*. ORES. [Extinction de l'éclairage public entre minuit et 5h : 164 communes ont déjà approuvé la proposition d'ORES | ORES](https://www.ores.be/fr/extinction-de-l-eclairage-public-entre-minuit-et-5h-164-communes-ont-deja-approuve-la-proposition-d-ores). Consulté le 30 mai 2025.
- Wallonie environnement-santé. (2025). *Plan ENVieS*. Service Public de Wallonie. <https://environnement.sante.wallonie.be/home/experts/plan-envies.html>. Consulté le 15 décembre 2024.

- WalStat. (2025). *Liège, Commune INS : 62063*. IWEPS (Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique). https://walstat.iweps.be/walstat-fiche-entite.php?entite_id=62063. Consulté le 10 février 2025.
- Wanvik, P. O. (2009). Effects of road lighting: An analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006. *Accident Analysis and Prevention*, 41(1), 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.10.003>
- Wang, T., Chen, Y., Chu, J., & Yu, S. (2023). Evaluation of Light Pollution Risk Degree Based on Spectral Clustering Algorithm. *2023 IEEE International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA)*, 64–973. <https://doi.org/10.1109/ICIPCA59209.2023.10257718>
- Welsh, B. C., Farrington, D. P., & Douglas, S. (2022). The impact and policy relevance of street lighting for crime prevention: A systematic review based on a half-century of evaluation research. *Criminology & Public Policy*, 21(3), 739–765. <https://doi.org/10.1111/1745-9133.12585>
- Xue, X., Lin, Y., Zheng, Q., Wang, K., Zhang, J., Deng, J., Abubakar, G. A., & Gan, M. (2020). Mapping the fine-scale spatial pattern of artificial light pollution at night in urban environments from the perspective of bird habitats. *The Science of the Total Environment*, 702, 134725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134725>
- Zheng, Q., Weng, Q., Huang, L., Wang, K., Deng, J., Jiang, R., Ye, Z., & Gan, M. (2018). A new source of multi-spectral high spatial resolution night-time light imagery—JL1-3B. *Remote Sensing of Environment*, 215, 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.016>